人の剛性調節機能の解析に基づく器用なロボットハンドの開発

Development of a dexterous robot hand with adjustable joint stiffness

1071004

研究代表者　東北学院大学　工学部　　教授　梶川伸哉

［研究の目的］

人と共存し，日常生活をサポートしてくれるロボットには人並みの器用さが求められる．特に，手腕系の器用さは取り扱う作業の豊富さから重要である．我々は指の自由度とともに関節の剛性を巧みに調節することで実に多彩な運動特性を実現している．例えば，落下物を柔らかく受け止める動作などは関節運動と関節剛性の協調により，衝撃力を十分に吸収した物体運動の停止作業である．

こうした作業の実現のためには機構的な剛性調節機能が必要となり，その調節方法も重要である．

そこで本研究ではロボットハンドに搭載可能な関節剛性調節機構の提案とそれを搭載したロボットハンドを用いた関節剛性調節について検討を行う．

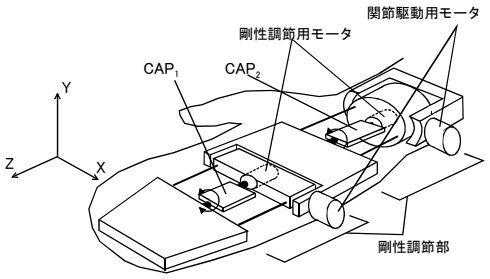


図１　ハンドイメージ図

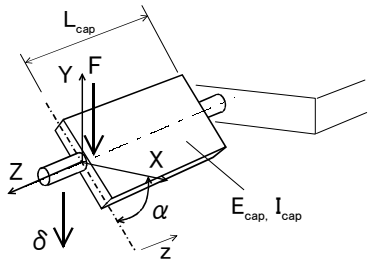


図２　CAP の概要

［研究の内容，結果］

１．関節剛性調整機構

本研究で提案する関節剛性機構を搭載したロボットハンドのイメージ図を図１に示す．
なお，以降は関節特性を表すものとして剛性の代わりにコンプライアンスを用いることとする（剛性の逆数）．本図に示すように関節剛性は関節部に挿入した弾性薄板(CAP：Compliance Adjuster　Plate)の姿勢を制御することにより実現する．

以下にそのメカニズムについて図２を基に説明を加える．

まず，CAP の長さ，断面２次モーメント，ヤング率をそれぞれ，$L_{cap}, I_{cap}, E_{cap}$とし，その一端に力$F$を加えたとする．そのとき CAP 全体に蓄えられる歪エネルギUは以下の式で与えられる．

$$U = \frac{1}{2E_{cap}} \int_0^{L_{cap}} \left(\frac{F^2 z^2}{I_{cap}} \right) dz \qquad (1)$$

カスティリアノの定理により上式から CAP 先端の変位量δは以下のように求められる．

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{L_{cap}^3}{E_{cap} I_{cap}} F \tag{2}$$

ここで，I_{cap} はその姿勢角 α により(3)式のように変化する．よって，力 F と変位 δ は以下のようなコンプライアンス $C(\alpha)$ で結ばれ，CAP の姿勢制御により，関節部の硬さを調節することができる．

$$I_{cap}(\alpha) = \frac{I_{capX} + I_{capY}}{I_{capX} \cos^2 \alpha + I_{capY} \sin^2 \alpha} \tag{3}$$

$$\delta = C(\alpha) F, \quad C(\alpha) = \frac{L_{cap}^3}{3 E_{cap} I_{cap}(\alpha)} \tag{4}$$

２．手先コンプライアンスモデル

次に，手首関節と指根元関節の二関節を有するハンドの手先コンプライアンスについて考える．ハンドの概要図を図３に示す.
図に示すようにハンドを指部と手のひら部に分けて考える.

まず，指部において手先に加わる力 F により蓄えられる歪エネルギ U_1 は指部と関節部における歪エネルギ U_{link1}, U_{cap1} を用いて次のように表せる.

$$U_1 = U_{link1} + U_{cap1} \tag{7}$$

また，このときの指部先端の変位量 δ_1 は以下のようになる.

$$\delta_1 = \frac{\partial U_1}{\partial F} \tag{8}$$

$$= \left\{ \frac{L_1^3}{3 E_1 I_1} + \frac{(L_1 + L_{cap1})^3}{E_{cap1} I_{cap1}} \right\} F_1 \tag{9}$$

$$\approx \frac{(L_1 + L_{cap1})^3}{3 E_{cap1} I_{cap1}} F \cos(\theta_1 - \theta_2) \tag{10}$$

ここで，L, I, E はそれぞれ指部(添え字１)，CAP 部（添え字 cap1）の長さ，断面二次モーメント，

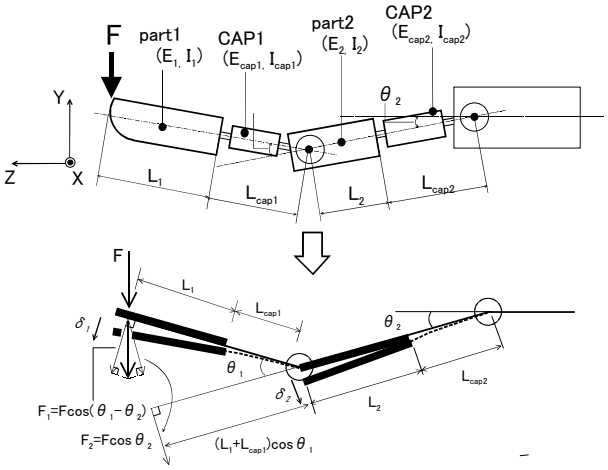


図３　２関節ハンドのモデル

ヤング率である．F_1 は手先力 F の指部直交成分である．(10)式は(9)式括弧内の第 1 項におけるヤング率が非常に大きいことから，それを無視したものである.

手のひら，手首関節部についても同様の方法でモデル式を考えることで，以下のような手のひら先端部変位量 δ_2 と外力 F の関係を得ることができる.

$$\delta_2 \approx \frac{(L_1^* + L_2 + L_{cap2})^3}{3 E_{cap2} I_{cap2}} F_2 \tag{11}$$

$$L_1^* = (L_1 + L_{cap1}) \cos \theta_1 \tag{12}$$

$$F_2 = F \cos(\theta_1 - \theta_2) \tag{13}$$

以上の(8)式～(12)式を基に外力 F と総手先変位量 δ_y は以下のように与えられる.

$$\delta_y = \delta_1 \cos \theta_1 + \delta_2 \cos \theta_2 \tag{14}$$

$$= (C_1(\alpha_1) + C_2(\alpha_2)) F = C(\alpha_1, \alpha_2) F \tag{15}$$

$$C_1(\alpha_1) = \frac{(L_1 + L_{cap1})^3}{3 E_{cap1} I_{cap1}} \cos \theta_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \tag{16}$$

$$C_2(\alpha_2) = \frac{(L_1^* + L_2 + L_{cap2})^3}{3 E_{cap2} I_{cap2}} \cos \theta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \tag{17}$$

以上のように二つの CAP の姿勢制御により，

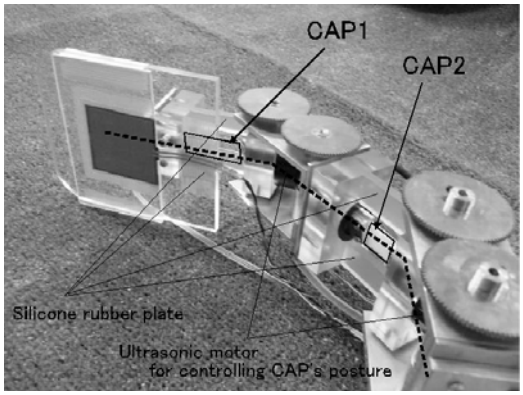


図４　プロトタイプの概観

ハンド手先のコンプライアンス $C(\alpha_1,\alpha_2)$ を調節することができる．

３．試作ハンドの概要

今回試作したハンドの概要を図４に示す．指関節と手首関節駆動には，それぞれ DC モータ（RE-MAX17,RE-MAX24：Maxon）を，CAP1，CAP２の姿勢制御には超音波モータ(USR30:新生工業)を利用した．CAP1，CAP2 の素材は共にアクリル樹脂であり，寸法は幅×長さ×厚さでそれぞれ 10×40×2mm,16×30×2mm である．また，CAP1，CAP2 の両側には CAP と平行に 2 枚のシリコーンゴムの板が関節部と指および手のひら部を繋ぐように装着されている．このゴム板により関節部と指および手のひら部が固定され，その間で CAP が回転することが可能になる

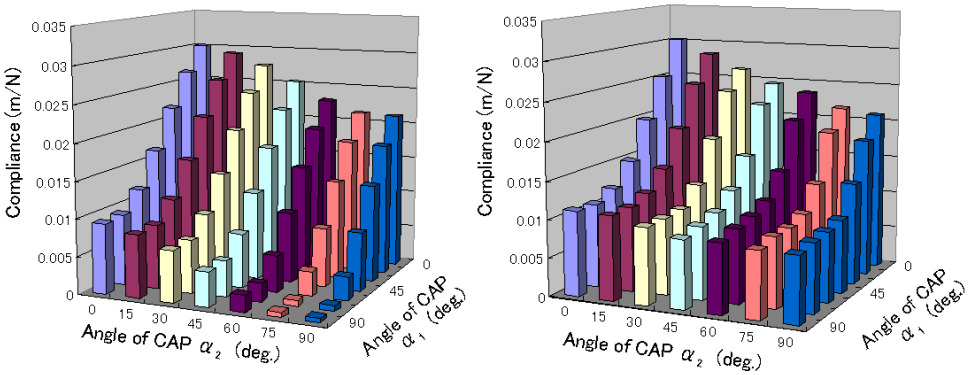
ハンド全体の大きさは人の手のひらとほぼ同サイズである．

４．コンプライアンス調節域の検証実験

ここでは，試作したハンドを用いてコンプライアンス調節域の確認とモデルの有効性について検討する．実験はハンドの指関節角 θ_1，手首関節角 θ_2 をそれぞれ 20deg.,30deg.の姿勢に保った状態で，手先に強制外力を加えた．その際の手先変位量からハンド手先のコンプライアンスを求めた．また，同様の条件下でモデルから求めたハンドコンプライアンスの値を比較した．

図５にその結果を示す．図５(a)はモデルから求めたコンプライアンス予測値であり，同図(b)は実験データから求めた実測値である．両者の傾向は非常によく類似しており，モデルが有効であることが確認される．

しかしながら，CAP１，２の姿勢角 α_1,α_2 が 45deg.以上になる領域ではモデルに比べ，実験値が高い値となっている．これは，この領域では CAP の曲げ剛性が上昇し，CAP の弾性変形は生じなくなる．このことを反映し，モデルではコンプライアンスは小さな値を示す．一方，実験においては加えられた外力が CAP 以外の部分，例えば，CAP 回転軸のクリアランス部分やその他の組み付け部の隙間でも吸収されるようになる，手先の変位が生じ，結果としてコンプライアンスはモデルよりも大きな値となった



(a) Model analysis　　(b) Experimental Results

図５　コンプライアンスのモデル予測値と実験値の比較

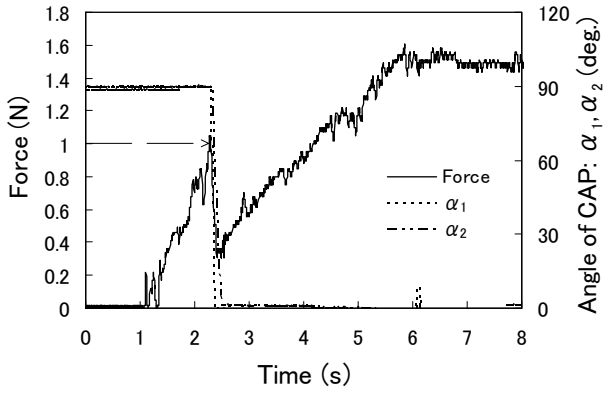


図６　コンプライアンス制御結果

ものと推測される．この点については構造および製作方法を改善することである程度修正することができると考えられる．

以上のことをまとめると，CAP の姿勢角が 0～45deg.の範囲では，構築したモデルが有効に機能することが確認できた．また，試作機でのコンプライアンス調節域は 0.01m/N から 0.03m/N の範囲であり，ほぼ 3 倍の変化となることが確認された．

５．コンプライアンス制御実験

次に，試作機を用いたオンラインでのコンプライアンスの調節実験を行い，調節の要する時間の検証を行った．実験はハンドの二関節を固定した状態で，CAP１，２を共に 90deg.に固定した状態を初期状態とした．これはハンドのコンプライアンスが最も低い状態である．このハンドの手先に力センサを押し当て 10mm/s の速度で強制変位を与える．強制変位に伴う接触力が 1.0N を超えた時点で CAP の姿勢を 0deg.まで変化させる．その姿勢制御に要する時間と変化前後の挙動の変化について確認した．その結果を図６に示す．

この図より，CAP の姿勢変化は接触力が設定値 1.0N に到達した後，若干の遅れを伴って始まっている．制御サンプリングは 3ms であるが，CAP１についてはおよそ 20ms，CAP２については 40ms 程度の遅れとなっている．この遅れは主として CAP の慣性と CAP 回転部の摩擦の影響によるものと考えられる．また，姿勢変換に要する時間は CAP1，２についてそれぞれ 80ms，180ms 程度である．以上のことから設定した閾値を超えてから CAP１，２のコンプライアンスの調節が完了するまでは，それぞれ，およそ 100ms，220ms 程度であると見積もることができる．

［今後の研究の方向，課題］

今後は，今回の検討内容を基に，より応答性およびコンプライアンス調節域の広いハンドシステムを製作することが挙げられる．また，そのハンドの運動とコンプライアンス調節の協調法を人の手の運動制御の解析を基に構築する予定である．

[成果の発表，論文等]

1) S.Kajikawa：Variable Compliance Mechanism for Human-care Robot 33rd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON2007), 2736-2741.

2) 梶川伸哉 ：剛性可変機構を有するロボットハンドの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2008（発表予定）