# 衝突時に物体や自己の破壊を防ぐ ロボットアーム用ディスロケーション関節の開発 *

小川　透 *1, 永谷　圭司 *2, 田中　豊 *3

# Development of Dislocation Joint to perform Mechanical Softness

Toru OGAWA*1, Keiji NAGATANI*2 and Yutaka TANAKA*3

*1 Toyota Industries Corporation
*2 Okayama University *3 Okayama University.

In recent years, robots' activity in human-robot-coexistence environment is desired. In such environment, it is very important to avoid giving a damage to human or objects from such robots. Therefore passive compliance joints (that gives mechanical softness) are attracted recently.
In this research, we propose a kind of passive compliance joint that softens a shock of a collision using aluminum corn clutch mechanism. The clutch slides when large external force is given to it, and the threshold value of the force can be adjusted automatically. We checked a performance of joints by applying it to a small robot arm. Furthermore, we have adopted the arm as a satellite arm to support main arm's work. In this paper, we introduce "a mechanism of the joint", "a verification of validity using experiments" and "an application example of the joint".

***Key Words*** : Passive compliance, Dislocation joint, Cone clutch, Friction

## 1. は　じ　め　に

近年，人が生活している環境下で動作を行うロボットの導入が望まれている．このような環境において，ロボットは，動作中誤って人間や周囲の作業環境にダメージを与えないことが重要である．しかしながら現在の技術では，ロボットが全ての可能性を予想し，人間や作業環境に衝突せずに，目的の動作を遂行することは不可能に近い．このためロボットには，衝突した場合に衝撃を吸収する機構が必要であり，これを実現する手段として，機構そのものに柔らかさを持たせるパッシブコンプライアンスの重要性が注目されている．

パッシブコンプライアンスを持つ機構については，これまでにも多くの提案がなされている(1)(2)．例えば，PPI（Programmable Passive Impedance)(3)は，関節駆動系内に非線形バネを組み込むことで，コンプライアンスを調節しつつ関節の駆動を行う方法である．また，NST（Nonlinear Spring Tensioner) (4)は，PPI と同様に非線形バネを利用し，動滑車を利用してコンプライアンス調節範囲を拡大している．これらの受動柔軟関節は，私たち人間との直接的な接触を前提としており，医療・福祉，ならびに家庭内作業への利用を目指している．そのため，コンプライアンス発生部には，通常バネを用いており，必要に応じた柔軟性の変化が可能となっている．しかしながら，これらの関節は，構造上，関節を固くした場合に不意の衝突の衝撃を吸収できず，逆に柔らかくした場合には，関節が振動してしまうといった問題が生じる．そのため，常に振動を抑制するための複雑な制御を行う必要がある．

本研究では，ロボットの通常動作時において常にリジットな状態を保ち，ロボットが不意に，作業環境中の人間や物体に衝突した場合にのみ，その衝突の衝撃を吸収する関節を目指すこととした．これにより，通常動作時には，普通のマニピュレータと同様，角度指定のみで振動せずに動作を行い，衝突時のみ，関節の押えを外すことで，衝突した相手ならびに，ロボット自身の自己破損を防ぐことが可能となる．

このような関節を実現するため，本研究では，関節を駆動するモータと関節本体との間に，コーンクラッチを挟み込むこととした．これによって，ロボットの通常動作時には，コーンクラッチ間の摩擦によって常に関節はリジットな状態で動作する．一方，ロボットの関節にある一定以上の外力が働いた場合には，原動側と従動側のコーンクラッチが互いに滑ることで，関節は衝突時の衝撃を吸収することが可能となる．また，

* 原稿受付 2003 年 9 月 21 日
*1 (株) 豊田自動織機
*2 岡山大学
*3 岡山大学
Email: keiji@ieee.org

このコーンクラッチ同士を押しつける力を制御することによって，原動側と従動側のコーンクラッチが共に滑り始めるまでの静止摩擦トルク (以下このトルクを「最大静止摩擦トルク」と呼ぶ) の調節を可能とした．本研究で提案するこのような関節を，衝撃吸収方法を脱臼に例えて「ディスロケーション関節」と呼ぶこととする．

本研究では，前述の特徴を備えたディスロケーション関節の製作を行い，この関節をロボットアームに搭載した．また，アームの姿勢の取り方に応じて，関節の脱臼開始トルクを調節し，重力保障を行うことで，アームの姿勢に関係なく，コーンクラッチ同士を滑らす外力を一定にする手法も合わせて提案した．さらにこの関節の応用例として，メインアームの周囲を周回するサブアーム（以下「サテライトアーム」と呼ぶ）に，このディスロケーション関節を適用し，この周回動作を利用した物体操作を実現した．

なお，ディスロケーション関節は，衝突の衝撃で関節を機械的に外す構造となっているため，移動中のマニピュレータそのものが有する慣性力ならびに衝突の瞬間の衝撃については，この関節で吸収することができない．したがって，マニピュレータには，別途に衝突の衝撃を緩和するためのカバー等をつける必要がある．また，本研究で対象とする環境は,「人が生活する環境下」としている．そのため，本研究では，対象とするロボットを小型移動ロボットに搭載可能な軽量マニピュレータとし，そのマニピュレータを高速に動作させることは考えていない．少なくとも，このマニピュレータが「力をかけ続けることを阻止」し，それによる対象物の破損やロボット自身の自己破損を防ぐことを目標としている．

本稿では，まず，本研究で開発したディスロケーション関節の利点について述べ（第 2 章），そのメカニズムの解説（第 3 章）ならびに，製作した関節の評価を行う（第 4 章）．次に，製作した関節を実際のロボットアームへ組み込み，そのアームの姿勢に応じた，関節の脱臼開始トルク調節機能についての解説を行う（第 5 章）．さらに，ディスロケーション関節の応用として，この関節を組み込んだ，サテライトアームの解説を行い，これを用いた応用動作例（ペットボトルのキャップ開け）について紹介する（第 6 章）．

## 2. ディスロケーション関節の提案

人が生活している環境下において，ロボットアームは，人や物体と衝突する際に衝撃を吸収する機構が必要である．そのため，いくつかの研究機関によって，

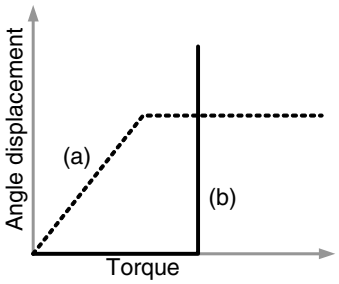


Fig. 1　Relation between angle displacement and torque

バネを用いた受動柔軟関節（パッシブコンプライアンス）の提案が，これまでなされてきている．しかしながら，このような関節は，バネが固い場合には，不意の衝突の衝撃を十分に吸収できず，逆にバネが柔らかい場合には，関節の振動を抑える複雑な制御が必要不可欠となる．この問題点を解決するために，バネの固さを自動調節する機構を組み込んだ関節もいくつか提案されているが，やはり，バネの硬さと制御性のトレードオフが問題となっている．

関節にバネを利用する場合，バネの性質上，関節にかかる力に比例した偏差が生ずる．この特徴を表したグラフを図 1-(a) に示す．また，手先に力がかかる場合，その力は各関節に分配されて偏差が生ずるため，単純な制御によって手先の位置精度を保つことは難しい．

このような状況を踏まえ，本研究では，従来の受動柔軟関節とは別の発想による受動柔軟関節を提案する．この関節は，回転方向に対して，ある一定以内の外力がはたらいた場合には，通常のマニピュレータと同等なリジッドな動作を行い，この力を超えた時のみ，その力を逃がすものである．この特徴を表したグラフを図 1-(b) に示す．この挙動は，人間で言うところの脱臼のような動作であるため，本研究では，この構造を有する関節を「ディスロケーション関節」と名付けた．次章では，本研究で製作したディスロケーション関節の構造と，その動作について述べる．

## 3. ディスロケーション関節のメカニズム

**3·1　曲げ関節構造**　　まず，関節の開発に際しては，小型ロボットアームへの応用を考慮し，小型・軽量化を重視した．本研究で製作したディスロケーション関節の構造と外観を図 2，図 3 に示す．

この関節では，2 つのアルミ製のコーンクラッチ間の摩擦を利用し「関節にかかる力がある値以上になるまでは関節角度を保ち，ある値を超えると関節が滑り出す機構」を実現した．この 2 つのコーンクラッチの写真を図 4 に示す．この機構では，まず，片側のコーンクラッチが原動側のシャフトに固定され，もう一方

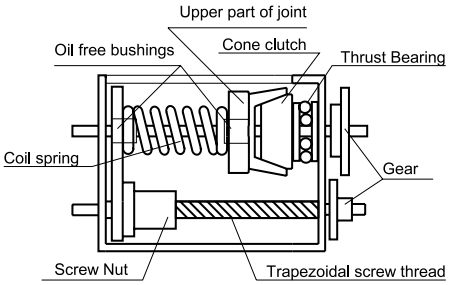


Fig. 2　Structure of dislocation joint

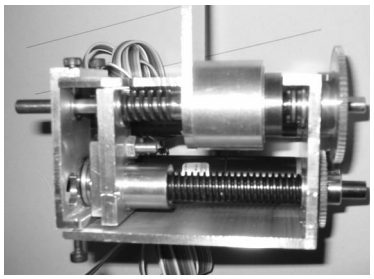

Fig. 3　Photo of dislocation joint

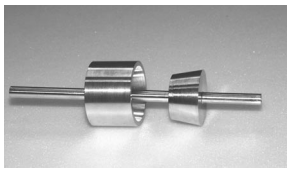

Fig. 4　Photo of cone clutch

が駆動源を有する反対側の骨格に固定されている．この構造上，原動側と従動側の 2 つの骨格は，このコーンクラッチの摩擦面のみで固定されている状態となる．そのため，このコーンクラッチを片側から押し付けることにより，モータの伝達トルクが従動側に伝わり，関節を曲げることが可能となる．一方，マニピュレータが環境中の物体に衝突すると，この関節に力がかかり，その力がコーンクラッチ間の摩擦力を超える場合に，この摩擦面が互いに滑り始める．したがって，コーンクラッチを押さえつける力の強さを調節することで，コーンクラッチ間の静止摩擦トルクのコントロールが可能となる．

**3·2　最大静止摩擦トルクの調節構造**　本研究では，コーンクラッチを押さえつける力の強さを調節するために，バネを機構的に縮ませる「30 度台形ねじを用いた調節機構」を，関節に搭載することとした．

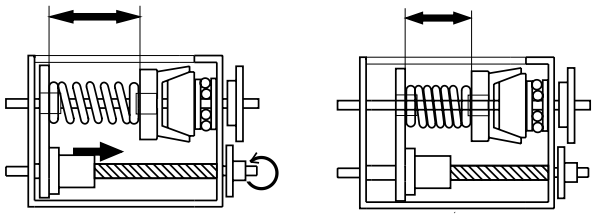

Fig. 5　Adjustment mechanism of friction force between corn clutches

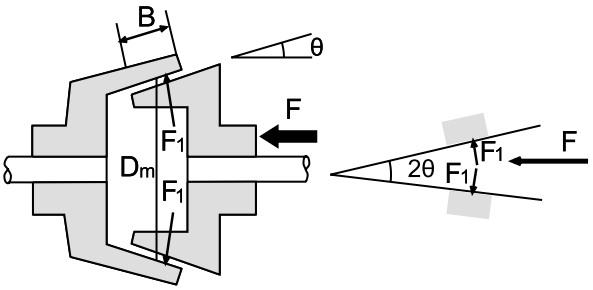


Fig. 6　Model of a friction of dislocation joint

この調節構造は，駆動源であるモータが回転を始めると，ギアのかみ合いにより 30 度台形ねじが回転する．これにより，30 度台形ねじ上のナットがスライドし，ナットに固定した押し付け板が，関節の回転軸をナットと共にスライドする (図 5)．この押し付け板がバネを伸縮させることにより，最大静止摩擦トルクの調節が可能となる．

## 4. ディスロケーション関節の最大静止摩擦トルク

ディスロケーション関節において，関節角度を保つことが可能な関節にかかる最大のトルク（最大静止摩擦トルク）を把握することは必須である．そこで，製作したディスロケーション関節が，どの程度の最大静止摩擦トルクを有するか検討するため，コーンクラッチ同士を押さえつける力と最大静止摩擦トルクの関係を解析した[(6)(7)]．以下に，この解析結果について述べる．

**4·1　最大静止摩擦トルクの解析**　図 6 に示すように，原動側のカップ（左）に対し，従動側のコーン（右）を力 $F$ によって押し付けることで，円錐面に対し，従動側のコーンの内側は，ほぼ直角方向に $F_1$ の力で押し付けられることになる．

円錐の頂角を $2\theta$ とすると，力 $F$ と力 $F_1$ の関係はくさびの理論から

$$F = F_1 \sin\theta + \mu F_1 \cos\theta \tag{1}$$

が成り立つことから

$$F_1 = \frac{F}{\sin\theta + \mu\cos\theta} \tag{2}$$

となる．

一方，接触面の平均直径を $D_m$ とすると，原動軸の最大静止摩擦トルク $T$ は，

$$T = \mu F_1 \frac{D_m}{2} \tag{3}$$

となる．(1)〜(3）式より，従動側のコーンを押し付ける力 $F$ と最大静止摩擦トルク $T$ の関係は，

$$F = \frac{2T}{\mu D_m}(\sin\theta + \mu\cos\theta) \tag{4}$$

と表すことができる．この式より，コーンクラッチ間の最大静止摩擦トルク $T$ は，$F$ によって線形的にコントロールできることがわかる．

**4·2　脱臼開始トルクの測定実験**　製作したディスロケーション関節では，関節にかかるトルクを，直接コーンクラッチで受ける仕組みとなっているため，前節で求めたコーンクラッチ間の最大静止摩擦トルクが，関節の脱臼が始まる脱臼開始トルクに一致すると考えられる．そこで本研究では，実際の関節を用いて，脱臼開始トルク（脱臼を始める最小のトルク）の測定実験を行った．

まず，ディスロケーション関節の回転軸から 100[mm] の地点にフォースゲージを垂直にあて固定する．その状態から動力源である関節の駆動モータを回転させ，関節が脱臼を開始する瞬間のフォースゲージが示す値の最高値を記録する．次に，ディスロケーション関節に内蔵したばねの長さを，14，13，12，11[mm](従動側のカップを押す力は，それぞれ 23，46，69，92 [N]) と順次変化させ，内臓したばねの長さに応じた同様の測定を行う．この測定は，ヒステリシスについての検討もあわせて行うため，ばねを縮めていった場合と，伸ばしていった場合の 2 通りに分けて行うこととした．なお，この実験には，バネ定数 22.9[N/mm]，自然長 15[mm] のコイルスプリングを使用した．

**4·3　実験結果と考察**　上述の一連の操作を 10 回行い，その結果を記録したものと，前節の (4) 式によって計算された数値との比較を図 7 に示す．ここで，理論値の算出に際し，コーンクラッチ間の静止摩擦係数 μ については，アルミニウムの一般的な摩擦計数[8] より，μ=1.3 として計算することとした．

この図からもわかる通り，(4) 式から導き出される理論値と，測定実験によって得られた数値とを比較すると，多少分布が上に出ているが，ほぼ近い値が得られた．一方，ヒステリシスについては，測定前の予想として，ばねが押す力によって，コーンクラッチが変形し，ばねを縮めていった場合よりも，ばねを伸ばしていった場合の方が，最大静止摩擦トルクが大きくなると予測していた．しかしながら，図 7 からもわかるように，本測定においては，その差異はほとんど認められなかった．これにより，コーンクラッチを押さえるバネを調節することで，最大静止摩擦トルクを制御することが可能であり，ロボットアームへ適用が可能であると言える．なお，図中，ばねを縮めていった場合とばねを伸ばしていった場合の分散をわかりやすく表示するため，ばねを伸ばしていった場合のデータを少し右側にずらして表示している．

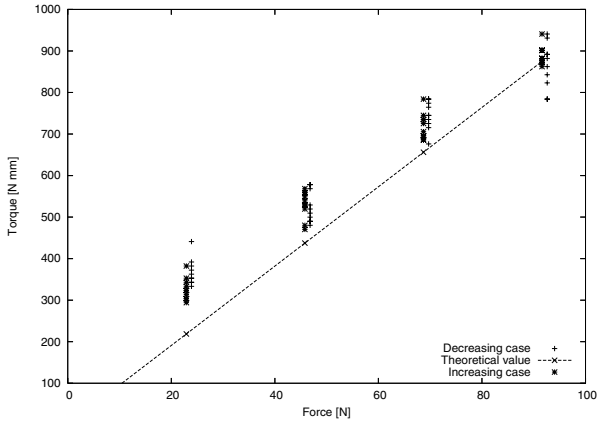


Fig. 7　Relation between force and torque

## 5. ディスロケーション関節のアームへの適用

**5·1　ロボットアームの構成**　ロボットアーム（以下アームと呼ぶ）の関節にかかるトルクは，一般に重力の影響のため，アームの姿勢のとり方や，把持物体の重量に応じて変化する．したがって，ディスロケーション関節をアームへ組み込む際，一定の外力まで関節が滑らないようにするためは，アームの姿勢の変化に応じて，関節の脱臼開始トルクを調節する必要がある．そこで，本研究では，脱臼開始トルクを調節可能なディスロケーション関節を，最も負荷のかかる第 1 関節に組み込んだアームを製作することとした．図 8 に，製作した曲げ 2 自由度のアームを示す．

第 2 関節には，次節で述べる脱臼開始トルクを手動で調節するディスロケーション関節を搭載した．また，先端部分には，ラジコンサーボモータを駆動源とするエンドエフェクタを搭載した．これらのアームの骨格部材には，軽量化を考慮し，アルミ材を使用した．その結果，モータも含めたアームの総重量は約 900[g] と

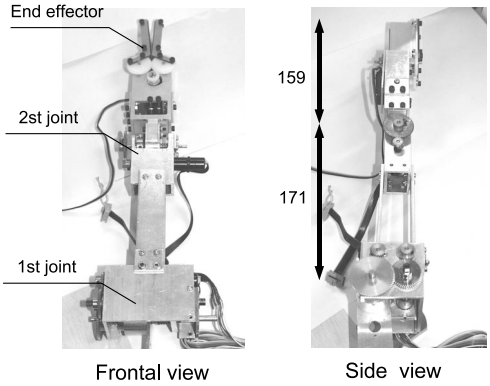


Fig. 8　Photo of the robot arm

なった．

**5·2　第 2 関節の構造**　　アームの第 2 関節については，それほど手先の重量が大きくないため，姿勢の変化に応じて関節にかかるトルクの変化が小さいという理由から，脱臼開始トルクを手動で調節するディスロケーション関節を搭載することとした．この関節の構造及び，外観を図 9 に示す．この関節は，2 枚のフッ素ゴム同士がすべることで，衝突時の衝撃を逃がすことのできるディスロケーション関節を有する[(9)]．具体的には，フッ素ゴムの一方をシャフト（従動側）に固定し，もう一方を駆動源を有する反対側の骨格（原動側）に固定する．これらのフッ素ゴム同士をスプリングにより押し付けることで，このゴム間の摩擦により，原動側のモータの伝達トルクが従動側に伝わり，関節を曲げることが可能となる．また，衝突などにより，関節に大きな力がかかり，2 枚のフッ素ゴム間の摩擦力をこえる力がはたらいた場合，フッ素ゴム同士がすべり始める．これにより，衝突の衝撃を逃がすことができる．したがって，2 枚のフッ素ゴムを押さえつけるスプリングの強さを手動で調節することで，脱臼開始トルクを調節することが可能である．

**5·3　アームの姿勢と脱臼開始トルクの関係**　　アームの姿勢の変化にかかわらず，関節のコーンクラッチが滑り出すための外力を一定に保つためには，アームの自重を考慮し，アームの姿勢に応じた関節の脱臼開始トルクの調節が必要である．そこで，本節では，重力によりアームの自重が関節に及ぼすトルクを求めるための，このアームの運動学解析について説明する．

まず，本研究で試作したアームの基準姿勢を図 10 に示すように定義する．ただし，リンクベクトルを $l_i$，回転軸ベクトルを $s_i$，手先の姿勢ベクトルを $a$，$b$ で表現した．次に，$x$，$y$，$z$ 軸のまわりの回転変換行列

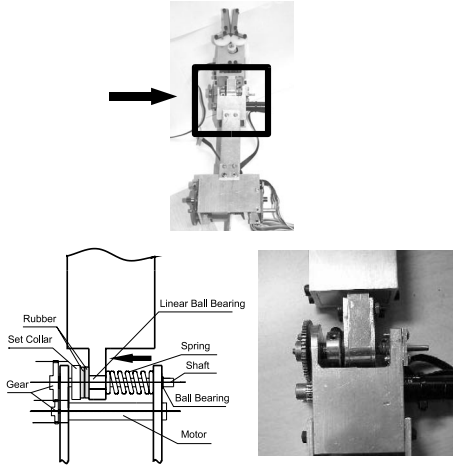


Fig. 9　Structure and photo of the second joint

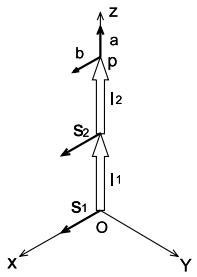


Fig. 10　The vector figure in the standard posture

をそれぞれ $E^{i\theta}, E^{j\theta}, E^{k\theta}$ で表すと，第 1，第 2 関節における座標変換行列は，それぞれ，

$$ {}^0R_1 = E^{i\theta_1}, {}^1R_2 = E^{i\theta_2} \tag{5} $$

で表されるため，各関節における座標変換演算子は，

$$ \begin{aligned} {}^1A_2 &= {}^1l_1 + {}^1R_2\,() = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & -S_2 \\ 0 & S_2 & C_2 \end{bmatrix} (), \\ {}^0A_1 &= {}^0R_1\,() = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & -S_1 \\ 0 & S_1 & C_1 \end{bmatrix} (). \end{aligned} \tag{6} $$

で表すことができる．ただし ( ) 内は，この回転変換をカッコ内のベクトルに施すことを示している．

上式を用いると，アーム先端の位置と姿勢は，アームの根元の座標系から見て，

$$ \begin{aligned} {}^0P_r &= {}^0A_1{}^1A_2{}^2P_r \\ &= {}^0A_1{}^1A_2[0\ 0\ 1]^T l_2 \\ {}^0b &= {}^0R_1{}^1R_2{}^2b \end{aligned} \tag{7} $$

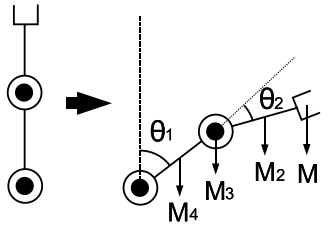


Fig. 11　Model of the robot arm with two joints

と表すことができる．これを更に整理すると，

$$
{}^0P_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -S_1 l_1 - S_{12} l_2 \\ C_1 l_1 + C_{12} l_2 \end{bmatrix} \tag{8}
$$

$$
\left({}^0a, {}^0b\right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -S_{12} & 0 \\ C_{12} & 0 \end{bmatrix} \tag{9}
$$

となる．ただし，

$$
\begin{aligned}
S_{12} &\equiv \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) = S_1 C_2 + C_1 S_2 \\
C_{12} &\equiv \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) = C_1 C_2 - S_1 S_2
\end{aligned} \tag{10}
$$

とした．この結果より，アームの先端の目標位置を $[p_x, p_y, p_z]^T$，姿勢ベクトルを $[a_x, a_y, a_z]^T$ とすると，

$$
\begin{aligned}
\theta_1 &= \mathrm{atan2}\left(a_y l_2 - P_y, P_z - a_z l_2\right) \\
\theta_2 &= \mathrm{atan2}\left(-a_y, a_z\right) - \theta_1
\end{aligned} \tag{11}
$$

となる．上式より，アームの手先の位置・姿勢と，各関節の回転角度の関係式が導出できた．

次に，姿勢の変化により，アームの重量が関節に与えるトルクについて考察する．各関節角度と，アームの各リンクならびに関節の重さが既知であれば，アームの重量が第 1 関節に及ぼすトルク $T$[N・mm] は，以下の手順で計算できる．

$$
\begin{aligned}
T = {} & l_1 \sin\theta_1 \left(M_1 + M_2 + M_3 + {}^{M_4}\!/_2\right) \\
& + l_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) \left\{M_1 + {}^{M_2}\!/_2\right\}
\end{aligned} \tag{12}
$$

ただし，ここでのアームのモデルは，図 11 に示すように定義した．

最後に，調整用モータの回転角と脱臼開始トルクの関係について考察する．関節の最大静止摩擦力 $T'$ は，脱臼開始トルクを調節するためのモータの回転角 $\theta_m$ とバネ定数によって，

$$
T' = \frac{\mu \cdot D_m \cdot k \cdot P \cdot G_m / G_s \cdot \theta_m / 360}{2\left(\sin\theta_C + \mu\cos\theta_C\right)} \tag{13}
$$

で表される．ただし，上式の各パラメータは，以下のように設定した．

$\mu$：コーンクラッチ間の静止摩擦係数

$D_m$：コーンクラッチの平均直径 [mm]

$k$：ばね定数 [N/mm]

$P$：台形ねじのピッチ [mm]

$G_m$：モータ側のギアの歯数

$G_S$：シャフト側のギアの歯数

$\theta_C$：コーンクラッチの傾斜角 [ °]

以上をまとめると，まず，アームの手先の目標位置と (11) 式から，アームの各関節角が求まる．さらにこの角度と (12) 式により，重力が第 1 関節におよぼすトルク $T$ が求まる．この $T$ に，関節に発生させたい摩擦トルク $T_{thd}$ を加えた関節の脱臼開始トルク $T'$ とし，これと (13) 式を用いることで，これを調節するためのモータの回転角 $\theta_m$ を求めることができる．

**5·4　脱臼開始トルク調節機構の動作検証**　上述のアームの姿勢に応じて，脱臼開始トルクを調節することで，アームの姿勢に関わらず，一定の外力まで関節が滑らないようにする関節の動作を実現した．

まず，基本姿勢の状態（手先が垂直に立っている状態）で，第 1 関節の回転軸から 100[mm] の地点にフォースゲージを垂直に当て，関節が滑り出すまでフォースゲージで関節を押し，力の最高値を記録する．次に，手先の目標位置・姿勢を変更する．この際，アームの手先の位置・姿勢から，第 1 関節に自重が及ぼすトルクを計算し，脱臼開始トルクの調節を行う．その後，与えられた手先位置を実現するように，各関節を回転させる．最後に，アームが目的位置に到達したところで，再び第 1 関節の回転軸から 100[mm] の地点にフォースゲージを垂直に当て，滑り出すまでフォースゲージを用いて関節を押し，フォースゲージの示す最高値を記録する．

**5·5　結果と考察**　前節で示した方法で，関節角を変更しつつ，マニピュレータの自重補償ができているかどうかの動作検証を行った．その結果，姿勢変更開始前と開始後との間で，脱臼開始トルクの差が最も大きかったのは，予想通り，図 12 に示した，関節にかかるマニピュレータの自重が最も大きくなった場合（つまり脱臼関節トルクの押し付け力の変化が最も大きい場合）であった．また，数回行った測定において，このときの値の差は，最大で，姿勢変更前が 340[N・mm]，姿勢変更後が 370 [N・mm] となった（誤差は，9 パーセント弱）．これにより，関節の脱臼開始トルクの調節が，有効に働いていることを確認した．

この動作の実現により，アームがどのような姿勢の場合においても，また，重さが既知である物体を把持

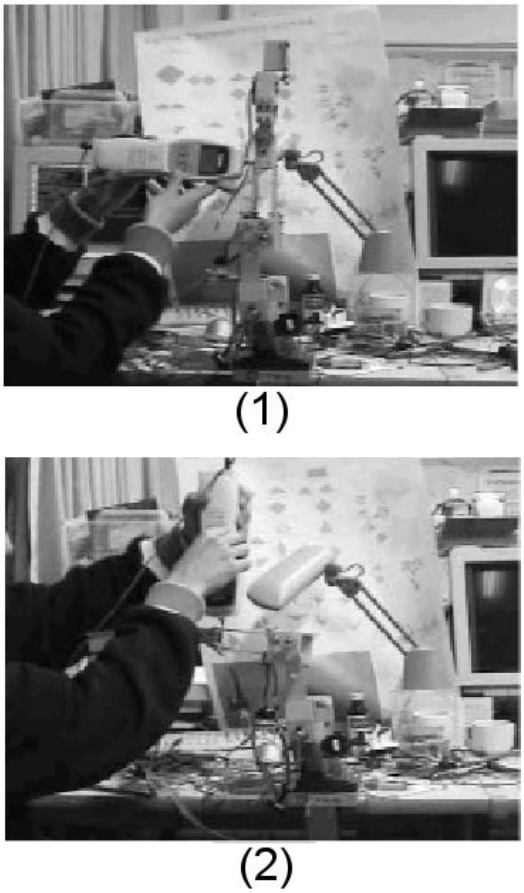


Fig. 12　Adjustment function of joints' hardness

した後でも，脱臼開始トルクをほぼ一定に保つことが可能となった．このことから，動作中，人間や周囲の作業環境に衝突した場合にも，常に一定のトルクがかかるまで，関節が滑らなくなる動作が実現可能となる．

## 6. ディスロケーション関節の応用例

**6·1　サテライトアームのメカニズム**　　アームが動作する際，別のアームによる補助的な動作が有効な場合がある．しかしながら，複数のアームを用いた動作は，広い作業スペースを必要とするだけでなく，衝突回避なども考慮する必要があり，制御や動作計画が複雑となる．そこで，本研究では，ディスロケーション関節を持つアームの応用例として，メインアームの周りを周回し，そのアームと協調動作を行うことができるサブアームの製作を行うこととした．これにより，作業対象やメインアームにダメージを与えず，かつ自らの破損を防ぐサブアームの実現が期待できる．なお，このサブアームは，メインアームを周回することから，サテライトアームと名付けた．

本研究室で構築するサテライトアームは，曲げ関節が 2 つ，メインアームに対する回転関節が 1 つの 3 自由度を持つものとした．一方，メインアームについては，アーム全体の手先部分のみを実装した．そのため，ここでは曲げ関節および回転関節の 2 自由度のみが実現されている．本研究で製作した，サテライトアーム及びメインアームのサイズならびに外観を図 13 に示す．

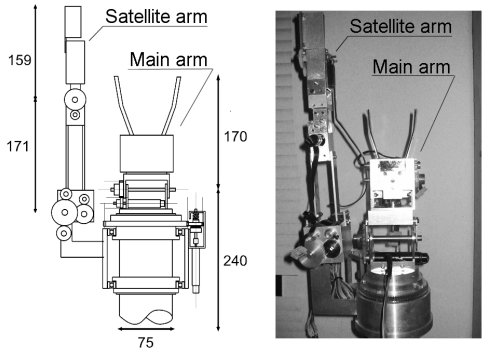


Fig. 13　An outview of satellite arm

**6·2　サテライトアームの動作検証**　　製作したサテライトアームを用いて，環境内の物体把持や，メインアームのハンドに把持させたペットボトルのキャップ開け動作など，幾つかの動作を行わせた．ただし，ここでは，オペレータが各関節角の値を個々に指定することで，これらの動作を行った．この間，第 1 関節の脱臼開始トルク調節機構は，マニピュレータの姿勢を考慮しつつ，自動的に調節を行わせることとした．

この動作において，障害物の衝突などがない場合，振動することなく，通常のアームと同様の動作を行うことができた．一方，動作中に，オペレータの指定角度の判断ミスから，サブアームが障害物やメインアームに衝突するといった事態も発生したが，この場合は，ディスロケーション関節が滑る（脱臼する）ことにより，障害物，メインアーム，サブアーム共に，壊れることはなかった．

**6·3　サテライトアームの問題点**　　この実環境における動作により，実装したアームの問題点が明らかになった．

1. マニピュレータの姿勢変化に伴い，第 1 関節の脱臼開始トルク調整機構が動作するが，本研究の実装では，バネを縮めるためのモータの速度が遅いため，所定のトルクを発揮するまで時間がかかる．このため，現在は，脱臼開始トルクの調節が終わった後に，関節の動作を行うこととしているが，このため，動作に非常に時間がかかるという問題がある．
2. この関節は，あくまで衝突時の衝撃を吸収する

という目的で実装されているが，一旦関節が滑り出すと，何度関節が回転したかという情報を検知することができない．そのため，今後の課題としては，関節が滑った際に，どれだけ滑ったかという情報を検知し，動作の復旧を行うことが挙げられる．

3. サブアームを周回させる回転関節には，現在自動調節が不可能なディスロケーション関節を利用しているが，メインアームの姿勢が変化した場合，ここにかかる重力補償トルクの変化は大きくなり，ここにも，自動調節が必要不可欠となる．

一方，ディスロケーション関節を有するアームの有用性の定量的な検討としては，様々な材質の障害物に衝突させ，対象となる障害物の状態を観察するという手法が考えられる．しかしながら，本研究で提案した関節は，衝突の衝撃により，関節を機械的に外すというメカニズムであるため，慣性力ならびに衝突の瞬間の衝撃については，この関節で吸収することができない．さらに，(1) 関節の向きによっては力を逃がすことができない，(2) 衝突時にアームが障害物に当たる部分によって対象物の被害が大きく異なる，といった要因により，様々な障害物に衝突させるという，定量的な有用性の検討が困難であった．これについては，今後の課題である．なお，本研究では，人が存在する屋内でのアーム利用を考えているため，サブアームを高速で動作させることは考えていない．

## 7. お　わ　り　に

本研究では，コーンクラッチの摩擦を利用し，ある一定以上の外力が働いた場合にクラッチ同士が互いにすべることにより，衝突時の衝撃をにがすことができる「ディスロケーション関節」の設計・製作を行った．この関節は，すべりはじめの力を調節できる機能を有する．これにより，衝突した対象物ならびに，自分自身を破損させることなく，リジッドな関節の動作を実現することが可能となる．また，コーンクラッチを押し付けるバネの強さに応じて，線形的に最大静止摩擦トルクを変化させることが可能であることを解析的また実験的に確かめることができた．さらに，この関節を組み込んだロボットアームを試作し，このアームの姿勢のとりかたによって，関節の脱臼開始トルクを自動的に調節できる機構を導入した．この機構の有効性は，動作確認を行うことで実験的に確かめられた．最後に，この関節をロボットアームに適用し，関節の動作の検証ならびに，関節が持つ問題点を確認した．

## 文　　献


(1) 岡田昌史：人間らしい柔らかな動きと駆動機構，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.6，pp.782-785 (1999).

(2) 森田寿郎：メカニカルソフトネスとコンプライアンス調節，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.6，pp.790-794 (1999).

(3) W.T.Towmsend：The effect of Transmission Design on Force Controlled Manipulator Performance，Technical Report 1054，MIT AI Lab.(1988).

(4) 兵藤和人，小林博明:非線形バネ要素を持つ腱制御手首機構の研究，日本ロボット学会誌，vol.11，no.8，pp.1244-1251 (1993).

(5) 岡田昌史，中村仁彦：サイバネティック・ショルダの開発－人間の肩の動きを模倣した 3 自由度機構，日本ロボット学会誌，vol.13，no.5，pp.666-673 (1995).

(6) 稲田重男，川喜田隆，本荘恭夫：機械設計論，コロナ社，pp.255-256 (1983).

(7) 清原隆徳：工業力学および機械設計の基礎，徳島県教育印刷株式会社，pp.465-466 (1992).

(8) 河野彰夫：摩擦の科学，裳華房，pp.66-68 (1989).

(9) 小川透，永谷圭司，田中豊：ディスロケーション関節を有するロボットアームの製作，第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，(2003).

(10) 広瀬茂男：ロボット工学 －機械システムのベクトル解析－，裳華房 (1987).