仮想非駆動関節を用いたマニピュレータによる可搬重量 を超えた物体のハンドリング*

(第1報, 概念と仮想非駆動関節の実現方法)

今村 純^{*1}, 小菅 一弘^{*2}

Manipulation of an Object Exceeding Load Capacity Using Virtually Unactuated Joints (1st Report, Concept and Method to Realize Virtually Unactuated Joints)

Jun IMAMURA^{*3} and Kazuhiro KOSUGE

^{*3} Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University,
01 Aoba-yama, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

The load capacity of a manipulator depends on a load capacity of a low output joint or load capacities of some low output joints of the manipulator. Even if a manipulator could not handle an object because of its load capacity, some of its joints still have enough capabilities for handling of the object. In this paper, we propose a method to handle an object using available joints of the manipulator by introducing virtually unactuated joints. The virtually unactuated joints are controlled so that no load will be applied to the joints. Experiments illustrate the validity of the method proposed in this paper.

Key Words: Robot, Manipulator, Actuator, Heavy Object, Actuated Joint, Virtually Unactuated Joint

1. はじめに

高齢化社会の到来とともに, 人の生活空間内で作業を行うロボットの開発が期待されている. 人の生活空間内で作業を行うロボットには, 安全性の面から通常のロボットに用いられるアクチュエータよりも小出力のアクチュエータが使用されることが望ましい. しかし, 小出力のアクチュエータで駆動されるロボットの可搬重量は一般に小さく, 軽量の物体しか操れない.

回転関節と剛体リンクで構成された一般的なシリアルリンク型マニピュレータ(以下, マニピュレータ)を用いて, 重量物のハンドリングを行うことを考えよう. 一般的に, マニピュレータのベース付近の関節は, それよりも手先寄りに搭載されたリンクやアクチュエータの重量を支える必要があるために, 大出力で大型のアクチュエータによって駆動され, 手先に近い関節は, 軽量で小型のアクチュエータにより駆動される. そのため, マニピュレータの可搬重量は, 出力が小さい手先付近に搭載されたアクチュエータの能力に依存してしまう場合が多く, ベース近くに搭載した大出力のア

クチュエータの能力を必ずしも効率良く活用していない. そこで本研究では, ベース近くに搭載されているアクチュエータの能力を有効利用し, マニピュレータの可搬重量を超えた物体のハンドリングを行う問題について考える.

これまで, 重量物を操るロボットに関する研究はいくつか行われてきた^{(1)~(3)}が, それらはいずれも重量物を操ることに適したメカニズムを開発し, その制御法を提案するというものであり, 一般的なマニピュレータを用いて重量物を操るための手法を提案するというものではなかった.

以下本論文では, 1台のマニピュレータを用いて重量物を操ることを考える. まず第2章では, 本研究において重量物のハンドリングのために導入する仮想非駆動関節の概念について説明する. 第3章ではマニピュレータが1個の仮想非駆動関節を有する場合を考え, そのときの仮想非駆動関節の制御法を示す. 第4章では第3章で示した方法を拡張し, マニピュレータが2個以上の仮想非駆動関節を有する場合における仮想非駆動関節の制御法を説明する. 第5章では実験を行い, 重量物の操りにおいて仮想非駆動関節が有効であることを示す. 最後に, 第6章で結論を述べる.

* 原稿受付 2002年7月19日.

^{*1} 学生員, 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01).

^{*2} 正員, 東北大学大学院工学研究科.

E-mail: imamura@irs.mech.tohoku.ac.jp

2. 仮想非駆動関節

マニピュレータが可搬重量以上の重量物を把持し、各関節に力とトルクが加わった場合を考える。マニピュレータの回転関節は軸及び軸受けと減速機から構成されているとしたとき、軸及び軸受けには太く頑強な部材を用いることにより、その関節に加わる力に対してはダメージを受けずに済むことができるとする。一方、軽量かつ小型で丈夫な高減速比の減速機を作ることは一般に困難なので、手先付近に搭載された許容負荷が小さい関節はその軸回りに加わった許容負荷以上のトルクに対してダメージを受けてしまうことがあるとする。このとき、もしその関節が非駆動関節のように振る舞い、その関節に搭載された減速機にトルクが加わらなければ、その減速機にダメージを与えずに済むことができる。そこで本研究では、マニピュレータによる重量物ハンドリングの際に、許容負荷が小さい関節を非駆動関節のように振る舞わせることによって、その関節に許容負荷以上のトルクを加えることなく物体を操る方法を提案する。このように、あたかも非駆動関節であるかのように振る舞わせる関節を仮想非駆動関節と呼ぶこととする。

マニピュレータを用いて重量物を把持するとき、もし使用しているマニピュレータの関節が DD アーム等のように back drivability¹ を持っているのであれば、仮想非駆動関節である許容負荷の小さい関節は駆動しなければ良い。なぜなら、back drivability のある関節は滑節とみなすことができ、滑節はトルクを伝達しないからである。

一方、許容負荷の小さい関節が back drivability のない関節であったり、減速比が大きく back drivability が小さい関節である場合は、トルクが加わらないようにその関節を能動的に制御する必要がある。次章では、物体を操る際に許容負荷の小さい関節軸にトルクが加わらないようにするための仮想非駆動関節角度の導出法を示す。

また上述のように、仮想非駆動関節は加わったトルクに対して、そのトルクが加わらないような関節角度になるように制御される。そのため、操作者が任意に関節角度を指定することができず、物体を操る自由度が減少してしまう。このような欠点を補うための手法は第2報で述べる。

¹ 関節の出力側から力を加えて出力軸を動かすことができるかを示すものである。一般に減速機を搭載していない関節は back drivability を持ち、ウォームギア等で構成された減速機を搭載した関節は back drivability を持たない。

Fig. 1 Serial link manipulator with a virtually unactuated joint

3. 仮想非駆動関節が1個の場合

本章では、マニピュレータによる重量物の操りにおいて、物体を把持したことにより手先に加わった力／モーメントが各関節に及ぼすトルクが、1個の関節のみその許容負荷を超える場合に、その関節を仮想非駆動関節として制御することを考える。本章ではまず、仮想非駆動関節にトルクが加わらないようにするためのその関節から手先までのベクトルの導出を行う。次に、そのときの仮想非駆動関節の角度を求める方法を示す。最後に、静力学的解析を行うことにより、得られた仮想非駆動関節角度の中で安定なものを選ぶ方法を説明する。

なお本論文において、仮想非駆動関節は手先近くの関節であり、その関節より手先寄りにあるリンクは、把持した重量物に対して無視できる程軽量であると仮定しており、これらのリンクに加わる外力の影響は考慮していない。しかし、もしこの影響を考慮したい場合は、これらのリンクの重心に加わる外力が仮想非駆動関節に及ぼすトルクと等価のトルクを生じる外力が手先に作用していると考えれば良い。

3.1 仮想非駆動関節から手先までのベクトル 図1に示す n 自由度マニピュレータにおいて、リンク i にデカルト座標系 Σ_i が固定されているものとする ($i = 0, \dots, n$)。次に、マニピュレータの手先に Σ_i を基準とした力 ${}^i f \in R^3$ 及びモーメント ${}^i n \in R^3$ が作用し、第 i 関節軸にトルク τ_i が加わったとすると、次式の関係が成り立つ。

$$\tau_i = {}^i b_i \cdot ({}^i r_i \times {}^i f + {}^i n) \quad (1)$$

ここで、 ${}^i b_j \in R^3$ は、 Σ_i を基準とした第 j 関節の回転軸方向の単位ベクトルである。但し、このときの第 j 関節の角度は ${}^i b_j$ に対して、右ねじ方向の回転を正とする。 ${}^i r_j \in R^3$ は Σ_i を基準とした第 j 関節から手先までのベクトルを表している。次に、 i 番目の関節軸の許容負荷は小さく、トルク τ_i が加わって

Fig. 2 Angle ϕ_i between $^i r_i$ and $^i b_i$ Fig. 3 Angle α_i between $^i r_{id}$ and $^i f \times ^i b_i$

はならないと仮定すると, $\tau_i = 0$ より, 次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} -^i b_i \cdot ^i n &= ^i b_i \cdot (^i r_i \times ^i f) \\ &= ^i r_i \cdot (^i f \times ^i b_i) \end{aligned} \quad (2)$$

以上のことから, $^i r_i$ が式 (2) を満足するように制御されれば, その関節軸には過大なトルクが加わることなく重量物を操ることができるということが分かる.

次に, 式 (2) を満足する $^i r_i$ を $^i r_{id}$ として, $^i r_{id}$ を求める方法について説明する. まず, $^i r_i$ と $^i b_i$ のなす角を ϕ_i とする (図 2). 次に第 i 関節以外の関節軸を固定したとすると, 第 i 関節から手先までのベクトル $^i r_i$ は $^i b_i$ を中心に一定の角度 ϕ_i で回転すると考えることができるので, 内積の計算より次式の関係が求まる.

$$^i r_i \cdot ^i b_i = |^i r_i| |^i b_i| \cos \phi_i \quad (3)$$

よって式 (3) より, ϕ_i は次式のように求まる.

$$\phi_i = \cos^{-1} \left(\frac{^i r_i \cdot ^i b_i}{|^i r_i| |^i b_i|} \right) \quad (4)$$

次に, $^i r_{id}$ と $^i f \times ^i b_i$ のなす角を α_i とすると, 式 (2) の右辺は次式のように書き直される (図 3).

$$^i r_{id} \cdot (^i f \times ^i b_i) = |^i r_{id}| |^i f \times ^i b_i| \cos \alpha_i \quad (5)$$

式 (2) と (5) より, 次の関係が得られる.

$$-^i b_i \cdot ^i n = |^i r_{id}| |^i f \times ^i b_i| \cos \alpha_i \quad (6)$$

よって式 (6) より, α_i は次式のように求まる.

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left(\frac{-^i b_i \cdot ^i n}{|^i r_{id}| |^i f \times ^i b_i|} \right) \quad (7)$$

Fig. 4 Derivation of $^i r_{id}$

以上より, $^i r_{id}$ は図 2 より, $^i b_i$ とのなす角が ϕ_i , 図 3 より, $^i f \times ^i b_i$ とのなす角が α_i のベクトルである. よって, $^i r_{id}$ は図 4 において $\overrightarrow{OB}$ と $\overrightarrow{OC}$ である. $\overrightarrow{OB}$ と $\overrightarrow{OC}$ すなわち $^i r_{id}$ はそれぞれ $\overrightarrow{OD}$ を $^i b_i$ の回りに角度 $\pm\beta_i$ だけ回転させたベクトルであるので, 次式のように表される.

$$\begin{aligned} ^i r_{id} &= R(^i b_i, \pm\beta_i) \overrightarrow{OD} \\ &= R(^i b_i, \pm\beta_i) (\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AD}) \\ &= \overrightarrow{OA} + R(^i b_i, \pm\beta_i) \overrightarrow{AD} \end{aligned} \quad (8)$$

但し, $R(a, \theta)$ は次式のように単位ベクトル a を回転軸として右ねじの方向に角度 θ 回転させる 3×3 の回転行列である⁽⁷⁾.

$$R(a, \theta) = \begin{bmatrix} a_x^2 v \theta + c \theta & a_y a_x v \theta - a_z s \theta & a_z a_x v \theta + a_y s \theta \\ a_x a_y v \theta + a_z s \theta & a_y^2 v \theta + c \theta & a_z a_y v \theta - a_x s \theta \\ a_x a_z v \theta - a_y s \theta & a_y a_z v \theta + a_x s \theta & a_z^2 v \theta + c \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで, $c \theta = \cos \theta$, $s \theta = \sin \theta$, $v \theta = 1 - c \theta$ であり, a_x , a_y , a_z はそれぞれベクトル a の成分を表している. 次に, 角度 β_i は図 4 より, 次式のように求められる.

$$\beta_i = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \phi_i}{\cos \alpha_i} \right) \quad (10)$$

式 (8) において, $\overrightarrow{OA}$ は $^i b_i$ と平行で, 長さが $|^i r_{id}| \cos \phi_i$ のベクトル, $\overrightarrow{AD}$ は $^i f \times ^i b_i$ と平行で, 長さが $|^i r_{id}| \sin \phi_i$ のベクトルであるので $^i r_{id}$ は次式のように求まる.

$$\begin{aligned} ^i r_{id} &= \frac{|^i r_{id}| \cos \phi_i}{|^i b_i|} ^i b_i \\ &\quad + R(^i b_i, \pm\beta_i) \left\{ \frac{|^i r_{id}| \sin \phi_i}{|^i f \times ^i b_i|} (^i f \times ^i b_i) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

以上のように, マニピュレータ手先に作用した力/モーメントに対して, 許容負荷の小さい第 i 関節軸にトルクが加わらないようにするためのその関節から手先までのベクトル $^i r_{id}$ が得られた.

3.2 仮想非駆動関節角度の導出 ここでは、仮想非駆動関節である第 i 関節から手先までのベクトルが ${}^i r_i$ と ${}^i r_{id}$ のときの第 i 関節角度をそれぞれ θ_i と θ_{id} として、式 (11) で得られた ${}^i r_{id}$ から θ_{id} を求める方法を示す。但し、 ${}^i r_i$ はマニピュレータ手先に力/モーメントが加わった直後で、第 i 関節軸にトルクが加わっている状態での第 i 関節から手先までのベクトルであるとする。さらに、このときの第 i 関節角度 θ_i を含むマニピュレータの全ての関節角度は各関節に搭載されたエンコーダ等の角度センサにより測定できるものとする。

${}^i r_i$ が第 i 関節軸、つまり、 ${}^i b_i$ まわりに回転して ${}^i r_{id}$ になるとき、第 i 関節角度は θ_i から θ_{id} になる。つまり、 ${}^i r_i$ は ${}^i b_i$ まわりに角度 $\theta_{id} - \theta_i$ だけ回転すると ${}^i r_{id}$ に一致する。以上の関係を用いると次式が成り立つ。

$${}^i r_i \cdot {}^i r_{id} = |{}^i r_i| |{}^i r_{id}| \cos \delta_i \quad (12)$$

ここで、 ${}^i r_i$ と ${}^i r_{id}$ はそれぞれ ${}^i r_i$ と ${}^i r_{id}$ を ${}^i b_i$ を法線ベクトルとする平面に射影したベクトルであり、 δ_i は ${}^i r_i$ と ${}^i r_{id}$ の間の成す角度である。式 (12) より、 δ_i は次式のようにになる。

$$\delta_i = \cos^{-1} \left(\frac{{}^i r_i \cdot {}^i r_{id}}{|{}^i r_i| |{}^i r_{id}|} \right) \quad (13)$$

ここで δ_i は ${}^i r_i$ と ${}^i r_{id}$ の間の成す角なので、 θ_{id} と θ_i を用いて次式のように表される。

$$|\theta_{id} - \theta_i| = \delta_i \quad (14)$$

よって式 (14) より、 δ_i は次式のようにになる。

$$\theta_{id} = \theta_i \pm \delta_i \quad (15)$$

式 (15) において、1つの ${}^i r_{id}$ 当たり 2 種類の θ_{id} が得られたのは、式 (13) において、 δ_i を内積の計算より求めたためである。そこで、実際に用いるべき θ_{id} を選択する必要があるが、これは ${}^i r_i \times {}^i r_{id}$ と ${}^i b_i$ の方向を比べることにより、決定できる。即ち、 ${}^i r_i \times {}^i r_{id}$ と ${}^i b_i$ が同方向なら ${}^i r_i$ が ${}^i b_i$ に対して正方向に回転して ${}^i r_{id}$ になるため、 $\theta_{id} = \theta_i + \delta_i$ となり、 ${}^i r_i \times {}^i r_{id}$ と ${}^i b_i$ が異方向ならその逆で、 $\theta_{id} = \theta_i - \delta_i$ となる。

3.3 静力学的解析 3.2 節において、手先に力/モーメントが作用したことにより関節に加わるトルクが仮想非駆動関節には加わらないようにするための仮想非駆動関節の角度 θ_{id} を導出してきたが、この角度は式 (11) より ${}^i r_{id}$ が 2 種類存在するため、2 種類得られる。そのため、実際に物体をハンドリングする際

Fig. 5 Angle δ_i between ${}^i r_i'$ and ${}^i r_{id}'$

には、どちらか一方の、マニピュレータがより安定となる方の角度を選択する必要がある。そこで、以下においてその 2 種類の角度の安定性を静力学的解析を行うことによって求める。

まず、一般的なマニピュレータの手先に力/モーメント $F = [f_x, f_y, f_z, n_x, n_y, n_z]^T$ が加わり、各関節軸にトルク $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_n]^T$ が生じたとする。このときの F と τ の間にはマニピュレータ手先と各関節間の静力学の関係より、 $\tau = J^T F$ が成り立つ。ここで、第 i 関節を仮想非駆動関節として上記で示したトルクが加わらないとした場合の関節角度の導出を行い、 $\theta_i = \theta_{id}$ とするとその関節のトルク τ_i は 0 となり、次式の関係が得られる。但し、 J^T_i はマニピュレータのヤコビ行列の転置行列 J^T の第 i 行成分である。

$$\tau_i = J^T_i F = 0 \quad (16)$$

次に、 θ_{id} を微小量 $\Delta\theta_i$ だけ変化させ、そのときに第 i 関節軸に生じた微小トルクを $\Delta\tau_i$ とすると、式 (16) は次式のように変化する。

$$\Delta\tau_i = J^T_i(\theta_1, \dots, \theta_{id} + \Delta\theta_i, \dots, \theta_n) F \quad (17)$$

ここで、角度の微小量 $\Delta\theta_i$ に対して、そのとき生じた微小トルク $\Delta\tau_i$ が $\Delta\theta_i$ を減少させる方向に働いたら安定であり、増加させる方向に働いたら不安定となる。即ち、 $\Delta\tau_i \Delta\theta_i < 0$ となるとき θ_{id} は安定で、 $\Delta\tau_i \Delta\theta_i > 0$ となるとき θ_{id} は不安定となる。以上のことから、仮想非駆動関節の角度を $\Delta\tau_i \Delta\theta_i < 0$ となるとき θ_{id} に追従するように制御すれば良いということが分かる。

3.4 例題 ここでは、仮想非駆動関節がどのような運動を行うかを直観的に理解できるように、簡単な例題を用いて説明する。図 6 における左側の図において、物体重心に加わる力ベクトルを $f = [0, -f, 0]^T$ 、仮想非駆動関節から手先までのベクトルを $r = [0, -r, 0]^T$ 、仮想非駆動関節の軸方向単位ベクトルを $b = [0, 0, 1]^T$ 、物体重心から手先までの距離を l とする。このとき、

Fig. 6 Movement of virtually unactuated joint

手先に加わる力ベクトルは f であり、モーメントベクトルを n とすると、 $n = [0, 0, fl]^T$ であるので、仮想非駆動関節に加わるトルク τ の値は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\tau &= b \cdot (r \times f + n) \\ &= fl\end{aligned}\quad (18)$$

次に、前節までの手法を用いて、仮想非駆動関節にはトルクが加わらないように制御すると、その関節角度は最終的に右側の図のように変化する。右側の図において、仮想非駆動関節から手先までのベクトルは $r = [r \sin \theta, -r \cos \theta]^T$ 、手先に加わる力ベクトルは $f = [0, -f, 0]^T$ 、モーメントベクトルは $n = [0, 0, fl \cos \theta]^T$ であるので、式 (18) と同様に仮想非駆動関節に加わるトルク τ の値は次のように求まる。

$$\begin{aligned}\tau &= f(l \cos \theta - r \sin \theta) \\ &= 0\end{aligned}\quad (19)$$

以上より、図 6 のような場合は、仮想非駆動関節から物体重心までのベクトルが物体重心に加わる力ベクトルと平行になるように、仮想非駆動関節の角度が変化するということが分かる。

4. 2 個以上の仮想非駆動関節を有する場合

3 章では、物体を操ることによりマニピュレータの関節軸に加わるトルクに対して、仮想非駆動関節を 1 個だけ有する場合において、その関節軸にはトルクが加わらないようにするためのその関節角度の導出法を示した。本章では、この手法を拡張し、仮想非駆動関節を 2 個以上有するマニピュレータに適用するための方法を示す。

まず、図 7 に示すような一般的なマニピュレータを考える。次に 3 章と同様に、リンク i にデカルト座標系 Σ_i を設置する。このマニピュレータにおいて、第 i 、 j 関節を仮想非駆動関節とする。また、第 i 、 j 関節以外の関節の許容負荷は大きく、その関節に加わったトルクを支持することができる。次に、 ${}^h b_k (\in R^3)$ を Σ_h を基準とした第 k 関節軸の単位方向

Fig. 7 Serial link manipulator with several virtually unactuated joints

Fig. 8 Moment ${}^j m_j$ acted on virtually unactuated joint

ベクトル、 ${}^i r_i (\in R^3)$ を Σ_i を基準とした第 i 関節から第 j 関節までのベクトル、 ${}^j r_j (\in R^3)$ を Σ_j を基準とした第 j 関節から手先までのベクトル、 ${}^j f (\in R^3)$ 、 ${}^j n (\in R^3)$ をそれぞれ Σ_j を基準とした手先に加わる力とモーメントベクトルとする (図 7)。 $i < j$ とすると、第 j 関節にトルクが加わらないようにするための第 j 関節の角度は手先に加わった力 ${}^j f$ 、モーメント ${}^j n$ より、3 章で示した方法を用いて求めることができる。

では次に、手先に加わった力／モーメントに対して、第 i 関節にトルクが加わらないようにするための第 i 関節の角度の導出法を示す。まず、手先に加わった力／モーメント ${}^j f$ と ${}^j n$ より、第 j 関節に加わるモーメントベクトル ${}^j m_j (\in R^3)$ は、次式で示される。

$${}^j m_j = {}^j r_j \times {}^j f + {}^j n \quad (20)$$

仮想非駆動関節とはその関節によって連結されたリンク間を力は完全に伝達するのに対して、モーメントはその軸方向に垂直な成分は伝達するが、平行な成分は伝達しないように制御される関節であるので、第 j 関節は仮想非駆動関節のとき図 8 より、第 j 関節に加わったモーメント ${}^j m_j$ の内、第 j 関節軸 ${}^j b_j$ と平行な成分 $({}^j m_j \cdot {}^j b_j) {}^j b_j$ は第 i リンクには伝達しないが、 ${}^j b_j$ と垂直な成分 ${}^j m_j - ({}^j m_j \cdot {}^j b_j) {}^j b_j$ はそのまま第 i リンクに伝達することとなる。よって、第 j 関節に作用するモーメントの内、第 i リンクに影響を及ぼすモーメントを新たに ${}^i n (\in R^3)$ とすると、次式のように

に示される.

$${}^i n = {}^i R_j \{ {}^j m_j - ({}^j m_j \cdot {}^j b_j) {}^j b_j \} \quad (21)$$

ここで, ${}^i R_j (\in R^{3 \times 3})$ は Σ_j を基準としたベクトルを Σ_i を基準としたベクトルに変換するための 3×3 の回転行列である. Σ_i を基準とした第 j 関節に加わる力ベクトル ${}^i f (\in R^3)$ は, 第 i リンクに完全に伝達され, その値は次式のように表される.

$${}^i f = {}^i R_j {}^j f \quad (22)$$

よって, 第 j 関節を新たにマニピュレータの手先と考えて, そこに加わる力/モーメント ${}^j f$ と ${}^j n$ を式 (21) と (22) より求めると, 3 章で示した方法より, 手先に加わった力/モーメントに対して, 第 i 関節軸にトルクが加わらないようにするための第 i 関節角度も求めることができる. 以上のことから, このように繰り返して計算していくことにより, 仮想非駆動関節が複数ある場合においても, 手先に作用する力/モーメントに対して, それらの軸にトルクが加わらないようにするためのそれらの関節角度を導出することができる.

5. 実 験

前章まで提案してきた手法の有効性を証明するために, 7 自由度マニピュレータ PA-10 を用いて以下に示す実験を行った. なお, 実験ではこのマニピュレータの第 3 軸を初期角度 (0°) に固定することにより, 6 自由度マニピュレータとして扱っている. それに伴い, 以下, このマニピュレータの第 4, 5, 6, 7 軸をそれぞれ第 3, 4, 5, 6 軸と呼ぶこととする. このマニピュレータの手先には力/トルクセンサが搭載しており, ハンドに加わった力/モーメントを計測することができる. マニピュレータの制御には CPU として Pentium III を使用し, 制御周波数は $512[\text{Hz}]$ としている. また, PA-10 の静的な可搬重量は $10[\text{kg}]$ なのに対して, ハンドリングした物体の重量はその可搬重量を超えた $15[\text{kg}]$ であった.

このマニピュレータにおいて, 第 1~3 関節は出力が大きいので, それらの関節は軸方向に加わるトルクに対して, 抗することができるトルクを出力することができるものとし, 出力トルクが小さい第 4, 5 関節を仮想非駆動関節として制御することとする. また, 第 6 関節の出力トルクは小さいが, 把持した重量物に加わる外力 (重力) の方向と手首から第 6 関節までのベクトルの方向がほぼ平行なため, 第 6 関節には大きなトルクは加わらず, 許容負荷以内のトルクのみが加

Fig. 10 Horizontal position of an object

(a)Fourth joint

(b)Fifth joint

Fig. 11 Joint angle

わるものとする. そこで本実験では, 第 6 関節は仮想非駆動関節としては制御せず, 通常の駆動関節として制御することとする. なお重量物を操る際に, 手首の位置に目標軌道を与え, 通常の駆動関節である第 1~3, 6 関節はこの軌道から計算された関節角度を目標の関節角度として, その角度に追従するように位置制御されている. また仮想非駆動関節である第 4, 5 関節は 3 章で求めた, 手先に加わった力/モーメントに対して, トルクが加わらないようにするための関節角度になるように位置制御されている. 各関節の位置制御においては, 目標関節角加速度をフィードフォワードとし, 目標関節角速度および角度をフィードバックとした PD 制御から各関節に入力するためのトルクを計算している.

実際に重量物をハンドリングしたときの様子を図 9 に示す. 物体を水平方向に素早く移動させたとき (図 9 の (b) から (d)) の物体の水平方向の位置の様子を図 10 に示す. このとき, 本来なら物体に働いた慣性力により手首部である第 4, 5 関節に加わってしまうトルクを, これらの関節を仮想非駆動関節として制御することにより, 加わらないようにしている様子を図 11 に示す. また, このときに手先に加わった力/モーメントが第 4, 5 関節に及ぼすトルクの様子を図 12 に示す. 図 12 から明らかなように, これらの関節の許容負荷である $12.96[\text{Nm}]$ に対して, 関節にはほとんどトルクが加わっていないことが分かる.

6. お わ り に

本論文では, 1 台のマニピュレータを用いた重量物のハンドリング問題について考え, 手先に荷重が加わっ

Fig. 9 Experiment

Fig. 12 Joint torque

たことにより各関節に加わるトルクに対して、許容負荷が小さい、主に手先付近に搭載された関節を仮想非駆動関節として制御することにより、それらの関節にはトルクが加わることなく物体の操りを行う方法を提案した。この手法を適用することにより、マニピュレータの可搬重量に依存しない物体のハンドリングを行うことが可能となる。

仮想非駆動関節角度は手先に加わった力／モーメントに依存するため、マニピュレータが把持した物体の運動を制御することができる自由度が減少してしまう。減少した自由度を補うためには、通常の駆動関節の数を増やせば良いので、冗長マニピュレータの利用や複数のマニピュレータによる協調ハンドリング等が考えられるが、冗長マニピュレータを利用する場合、通常の駆動関節の数を増やしても、上記の理由で物体の運動を完全に制御することができない。一方、複数のマニピュレータで物体を操る場合は、それらのマニピュレータを1つのパラレルマニピュレータと同様の機構と見なすことができるので、物体の運動を完全に制御することが可能となる。そこで第2報では、複数のマニピュレータを用いて物体を操る方法について検討する予定である。

References

- (1) K. Yuasa, T. Arai, Y. Mae, K. Inoue, K. Miyawaki and N. Koyachi, *Hybrid Drive Parallel Arm For Heavy Material Handling*, "Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems", (1999), pp.1234-1240
- (2) Y. Wang, W. S. Newman and R. S. Stoughton, *Workspace Analysis of the ParaDex Robot- a Novel, Closed-Chain, Kinematically-Redundant Manipulator*, "Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation", (2000), pp.2392-2397
- (3) M. Yamamoto, N. Yanai and A. Mohri, *Inverse Dynamics and Control of Crane-Type Manipulator*, "Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems", (1999), pp.1228-1233
- (4) 大隅久, 協調制御のための受動関節機構の設計, "ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集", Vol.B, (1995), pp.1293-1296
- (5) 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允, フリージョイントを利用したグラスプレス・マニピュレーション, "第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集", Vol.1, (1994), pp.229-230
- (6) 上村拓人, 佐藤雅一, 長谷川陽一, 梶谷誠, 明愛国, 金森哉吏, 受動／能動切り替え関節を有する移動マニピュレータによるパイプの挿入実験, "第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集", Vol.1, (2000), pp.527-528
- (7) J. M. McCarthy, *Introduction to Theoretical Kinematics*, The MIT Press, (1990)