

# 擬似非駆動関節を用いたマニピュレータによる 重量物ハンドリングにおける考察

## Consideration in Handling a Heavy Object by Manipulators Using Pseudo-unactuated Joints

○今村純\*, 小菅一弘\*

○Jun Imamura\*, Kazuhiro Kosuge\*

\*東北大学

\*Tohoku University

キーワード : ロボット (Robot), 操り (Manipulation), 超過荷重 (Overload),  
双腕マニピュレータ (Dual-manipulators)

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院 工学研究科 機械知能工学専攻 小菅研究室  
今村純, Tel.: (022)217-4035, Fax.: (022)217-4035, E-mail: imamura@irs.mech.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 様々な分野でのロボットの利用が検討され, 作業のロボット化が行われている。特に, 工場などで行われているような電子回路基板へのパーツの実装や各種組み立て作業等, 比較的小型の物体を扱う作業分野では, ロボットは著しい発展を遂げてきた<sup>1, 2)</sup>。しかし, 大型重量物を扱う分野ではあまり研究は行われておらず, 行われているものでも特殊な形状をしたものがほとんどである<sup>3, 4, 5)</sup>。大型重量物のハンドリング技術の確立により, 建造物の組み立てや解体, あるいは大型構造物の保守作業等への応用が期待されている。

一般的な回転関節で構成されたシリアルリンク型マニピュレータによる大型重量物のハンドリングを考えてみよう。通常, マニピュレータは, 根本の部分にはリンクやアクチュエータの重量を支

えるために必要な大出力のアクチュエータを搭載出来るが, 手先には軽量かつ小型のアクチュエータしか搭載させることが出来ない。そのため, マニピュレータの可搬重量は一番出力の小さい, 主に手先の近くに搭載されたアクチュエータの能力に依存してしまうことが多く, あまり有効とは言えない。

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, 出力の小さなアクチュエータを用いずに, 大出力のアクチュエータのみを用いる方法, つまり, 手先に加わった力/モーメントに対して, 許容負荷の小さな関節軸にトルクを生じさせない姿勢で物体を操作する方法を提案する。なお, 以下では, このようにトルクが加わらないような姿勢に制御される関節を擬似非駆動関節と呼び, 擬似非駆動関節を持つように制御されるマニピュレータを擬似非駆動関節を有するマニ

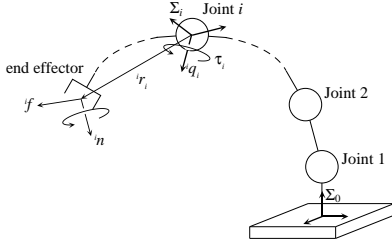


Fig. 1 Relation between force/moment of end-effector and torques of joints

ピュレータと呼ぶこととする。

## 2. 大型重量物の操り

本節では、回転関節のみからなるシリアルリンク型マニピュレータにより、大型重量物をハンドリングする問題を考える。前節で述べたように、一般には、マニピュレータのベースに近い関節の駆動には大型で大出力のアクチュエータを、手先には小型で軽量のアクチュエータを用いている。そこで、手先のアクチュエータに負荷トルクを加えることなく物体がハンドリング出来るかどうかについて考察する。

### 2.1 擬似非駆動関節が1つの場合

ここでは、マニピュレータには擬似非駆動関節が1つある場合を考える。Fig.1に示すようにマニピュレータの手先に力  ${}^i f \in R^3$  及びモーメント  ${}^i n \in R^3$  が加わり、第  $i$  関節軸にトルク  $\tau_i$  が発生したとすると、次式の関係が成り立つ。

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

ここで、 ${}^i q_i \in R^3$  は、第  $i$  関節の回転軸方向の単位ベクトルであり、 ${}^i r_i \in R^3$  は第  $i$  関節から手先までのベクトル(以下、本稿では手先ベクトルと呼ぶ)を表している。次に、 $i$  番目の関節軸は弱く、トルクが発生してはならないと仮定すると、

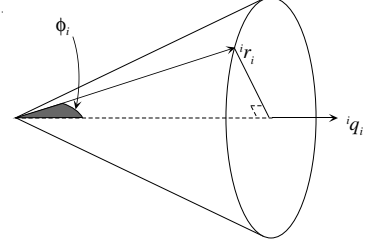


Fig. 2 Angle  $\phi_i$  between  ${}^i r_i$  and  ${}^i q_i$

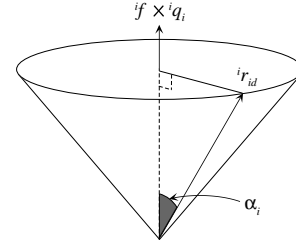


Fig. 3 Angle  $\alpha_i$  between  ${}^i r_{id}$  and  ${}^i f \times {}^i q_i$

$\tau_i = 0$  より、次式が成り立つ。

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

以上のことから、重量物を搬送する際に手先ベクトルが式(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を生じさせることなく行うことが出来るということが分かる。

次に、式(2)が成り立つときの  ${}^i r_i$  を  ${}^i r_{id}$  の目標値  ${}^i r_{id}$  として、 ${}^i r_{id}$  を求める方法について説明する。まず、第  $i$  関節は  ${}^i q_i$  を中心に回転しているので、 ${}^i r_i$  と  ${}^i q_i$  のなす角  $\phi_i$  は一定で、 ${}^i r_i$  と  ${}^i q_i$  の内積の計算より次式のように求まる(Fig.3)。

$$\phi_i = \cos^{-1} \left( \frac{{}^i r_i \cdot {}^i q_i}{|{}^i r_i| |{}^i q_i|} \right) \quad (3)$$

次に、 ${}^i r_{id}$  と  ${}^i f \times {}^i q_i$  のなす角  $\alpha_i$  を式(2)より求める。

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left( \frac{-{}^i q_i \cdot {}^i n}{|{}^i r_{id}| |{}^i f \times {}^i q_i|} \right) \quad (4)$$

求める  ${}^i r_{id}$  はFig.4において  $\vec{OB}$  と  $\vec{OC}$  なので、最後に、角  $\beta_i$  を次式より求めると、

$$\beta_i = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \phi_i}{\cos \alpha_i} \right) \quad (5)$$

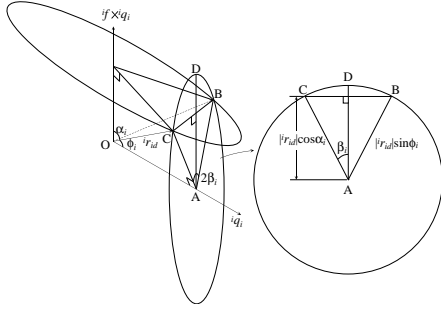


Fig. 4 Derivation of  ${}^i r_{id}$

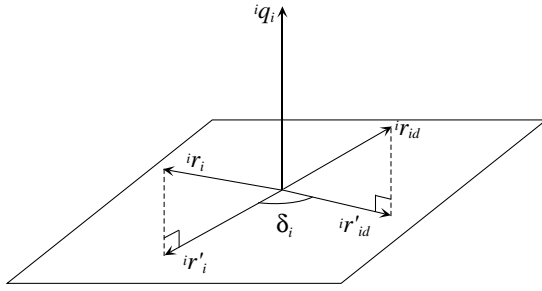


Fig. 5 Angle  $\delta_i$  between  ${}^i r'_i$  and  ${}^i r'_{id}$

${}^i r_{id}$  は次式のように求まる。但し、 $R(a, \theta)$  はベクトル  $a$  を回転軸として角度  $\theta$  回転させる回転行列である<sup>6)</sup>。

$${}^i r_{id} = \frac{|{}^i r_{id}| \cos \phi_i}{|{}^i q_i|} {}^i q_i + R({}^i q_i, \pm \beta_i) \left\{ \frac{|{}^i r_{id}| \sin \phi_i}{|{}^i f \times {}^i q_i|} ({}^i f \times {}^i q_i) \right\} \quad (6)$$

上述のように、マニピュレータ手先に加わった力／モーメントに対して、許容負荷の小さい関節軸にはトルクを発生しないマニピュレータの姿勢が得られたが、マニピュレータをそのような姿勢に制御するためには、その関節軸の角度を求める必要がある。そこで次に、式 (6) で得られた目標手先ベクトル  ${}^i r_{id}$  より擬似非駆動関節軸角度  $\theta_{id}$  求める方法を示す。まず、初期手先ベクトル  ${}^i r_i$  と目標手先ベクトル  ${}^i r_{id}$  を  ${}^i q_i$  を法線ベクトルとする平面上に射影した各々のベクトルの成す角を  $\delta_i$  とすると、次式のように示される (Fig.5)。

$${}^i r'_i \cdot {}^i r'_{id} = |{}^i r'_i| |{}^i r'_{id}| \cos \delta_i \quad (7)$$

$$\therefore \delta_i = \cos^{-1} \left( \frac{{}^i r'_i \cdot {}^i r'_{id}}{|{}^i r'_i| |{}^i r'_{id}|} \right) \quad (8)$$

よって式(8)より、 $\theta_{id}$  は以下のように表される。

$$|\theta_{id} - \theta_i| = \delta_i \quad (9)$$

$$\therefore \theta_{id} = \theta_i \pm \delta_i \quad (10)$$

式(10)において、1つの  ${}^i r_{id}$  当たり2種類の  $\theta_{id}$  が得られたのは、式(7)と(8)において、 $\delta_i$  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  $\theta_{id}$  を選択する必要があるが、これは  ${}^i r'_i \times {}^i r'_{id}$  と  ${}^i q_i$  の方向を比べることにより、決定出来る。即ち、 ${}^i r'_i \times {}^i r'_{id}$  と  ${}^i q_i$  が同方向なら、 $\theta_{id} = \theta_i + \delta_i$  であり、 ${}^i r'_i \times {}^i r'_{id}$  と  ${}^i q_i$  が異方向なら、 $\theta_{id} = \theta_i - \delta_i$  である。

また式 (6) において、目標手先ベクトル  ${}^i r_{id}$  は2種類得られるが、この関節軸における静力学的解析を行うことによって、より安定に物体が操れる方の  ${}^i r_{id}$  を選択することが可能である。

## 2.2 擬似非駆動関節が2つ以上の場合

2.1節で述べた方法は擬似非駆動関節が1つの場合に、擬似非駆動関節にはトルクが加わらない関節角度の導出法であったが、擬似非駆動関節が2つ以上ある場合もこの方法を応用することによって求めることが出来る。まず、Fig.7に示すような一般的なシリアルリンクマニピュレータを考える。このマニピュレータにおいて、 $i, j$  軸の許容負荷は小さくトルクは加わってはならないとし、これらの関節を擬似非駆動関節として制御することにする。ま

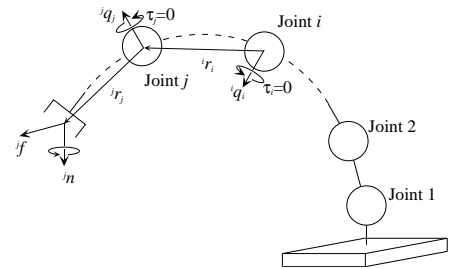


Fig. 6 Relation between force/moment of end-effector and joint torques in case of manipulator with several pseudo-unactuated joints

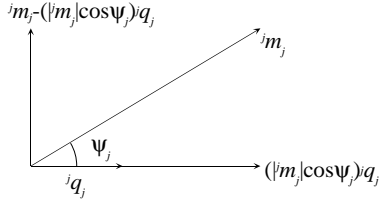


Fig. 7 Moment  ${}^j m_j$  acted on pseudo-unactuated joint

た,  $i, j$ 軸以外の関節の許容負荷は大きく, 関節角度を自由に制御出来るとする. 次に,  ${}^h q_k (\in R^3)$ を $h$ 座標系から見た $k$ 軸の単位方向ベクトル,  ${}^i r_i (\in R^3)$ を $i$ 軸から $j$ 軸までのベクトル,  ${}^j r_j (\in R^3)$ を $j$ 軸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 $j$ 座標系から見た手先に加わる力とモーメントベクトルとする. このとき,  $j$ 軸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.

$${}^j m_j = {}^j r_j \times {}^j f + {}^j n \quad (11)$$

$j$ 軸に加わるモーメント ${}^j m_j$ の内,  $j$ 軸と平行な成分は $j$ 軸を擬似非駆動関節とし, 2.1節の方法よりトルクが加わらない角度を求め, その角度になるように関節軸を制御することにより,  $i$ 軸には伝達しないようにすることが出来るが,  $j$ 軸と垂直な成分はそのまま $i$ 軸に加わることとなる. よって,  $i$ 軸に加わるモーメントを新たに ${}^i n (\in R^3)$ とすると, Fig.7より次式のように求められる.

$${}^i n = {}^i R_j \{ {}^j m_j - (|{}^j m_j| \cos \psi_j) {}^j q_j \} \quad (12)$$

ここで,  ${}^i R_j (\in R^{3 \times 3})$ は $j$ 座標系を基準としたベクトルを $i$ 座標系から見たベクトルに変えるための回転行列,  $\psi_j$ は $j$ 軸に加わるモーメントベクトル ${}^j m_j$ と $j$ 軸の軸方向単位ベクトルとのなす角である.  $i$ 座標系から見た $j$ 軸に加わる力ベクトル ${}^i f (\in R^3)$ は,  ${}^i f = {}^i R_j {}^j f$ より求まるので,  $i$ 軸にトルクが加わらない関節軸角度も求めることが出来る. 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, 擬似非駆動関節が複数ある場合に

においても, それらの軸にトルクが加わらない関節軸角度を導出することが出来る.

以上のように, マニピュレータ手先に加わった力/モーメントに対して, 許容負荷の小さな擬似非駆動関節軸にはトルクが発生しないような関節軸の角度が得られたが, このとき, この関節軸は手先の力/モーメントに依存してしまうため, 任意に動かすことが出来ない. これは, マニピュレータの自由度が減少したことを意味し, その結果, マニピュレータの作業領域が小さくなる, 複雑な作業が出来ない等の弊害が生じてしまう. そこで, 失われた自由度を補うために, 2本のマニピュレータを用いた双腕協調システムを以下の節で提案する.

### 3. 擬似非駆動関節を有する双腕マニピュレータによる物体の操りのための必要十分条件

本節では, 回転関節で構成されたシリアルリンク型マニピュレータの双腕協調による物体の操りにおいて, 擬似非駆動関節が存在しても, 物体の全自由度を任意に操り, その運動を完全に拘束することが出来るための必要十分条件を示す.

まず, 双腕マニピュレータの関節の中で, 許容負荷の大きい関節を駆動関節, 許容負荷の小さい関節を擬似非駆動関節とする. 物体を把持することによって, 各関節軸にトルクが加わるとき, 駆動関節軸は許容負荷が大きいので, トルクが加わっても動かないと仮定することが出来る. 一方, 擬似非駆動関節は軸にトルクが加わると動いてしまう. そのため, 擬似非駆動関節が存在すると, 物体の運動を拘束できない場合がある. そこで, 駆動関節が固定されていて, 擬似非駆動関節のみが動くことが出来るとした場合において, 物体を把持していても, 擬似非駆動関節が動かず, 物体の運動を拘束することが出来るかどうかを以下に示す手法を用いて調べてみよう.

物体を把持する際に、駆動関節軸は固定されると仮定すると、それらはリンクの一部とみなせるので、擬似非駆動関節のみで構成された閉ループのリンク機構を考えることが出来る。この閉ループリンク機構の任意の一部分を切断することによって得られる1本のシリアルリンクマニピュレータ(以下、擬似非駆動マニピュレータと呼ぶ。)を考える(Fig.8)。この擬似非駆動マニピュレータのヤコビ行列を求め、その階数を調べることによって、物体の操りの必要十分性を調べることが出来る。

[定理]作業空間の自由度を $m$ 、擬似非駆動関節の数を $n_p$ とする。このとき、物体の運動が完全に拘束され、物体を任意に操ることが出来るための必要十分条件は $\text{rank} J_p = n_p$ である。ここで、 $J_p (\in R^{m \times n_p})$ は擬似非駆動マニピュレータのヤコビ行列である。

証明[十分性]擬似非駆動マニピュレータの関節角度ベクトルを $\theta_p (\in R^{n_p})$ 、手先の位置/姿勢を表す一般化座標を $x (\in R^m)$ とすると、次式を得る。

$$\dot{x} = J_p \dot{\theta}_p \quad (13)$$

駆動関節が固定されていて、この擬似非駆動マニピュレータの手先の位置/姿勢は一定であるとする、次式が成り立つ。

$$0 = J_p \dot{\theta}_p \quad (14)$$

式(14)において、物体の運動を完全に拘束出来るということはこの式の解が $\dot{\theta}_p = 0$ 以外存在しないということである。 $0 = J_p \dot{\theta}_p$ を満たす解が $\dot{\theta}_p = 0$

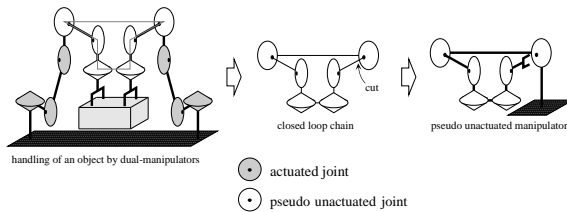


Fig. 8 Serial link manipulator obtained by cutting pseudo-unactuated joint link mechanism

以外存在しないということは、 $J_p$ が列フルランク、すなわち $\text{rank} J_p = n_p$ である。よって、十分性は証明出来た。■

証明[必要性]擬似非駆動マニピュレータにおいて、 $\text{rank} J_p = n_p$ であるとする。このことは、 $0 = J_p \dot{\theta}_p$ を満たす解が $\dot{\theta}_p = 0$ 以外存在しないということを意味する。 $0 = J_p \dot{\theta}_p$ を満たす解が $\dot{\theta}_p = 0$ 以外存在しないということは、擬似非駆動関節が動かないということである。このとき、把持物体の運動は完全に拘束される。よって、必要性は証明出来た。■

(例題)例として、作業空間の自由度が6、つまり $m = 6$ の場合を考えよう。擬似非駆動マニピュレータの関節数が7、つまり $n_p = 7$ のとき、 $J_p$ は $6 \times 7$ の行列になり、 $\text{rank} J_p = 6 < n_p$ となるので、物体の運動を拘束できない。同様に、 $n_p = 6$ のときは、 $J_p$ は $6 \times 6$ の行列になり、 $\text{rank} J_p = 6 = n_p$ となるので、擬似非駆動マニピュレータが特異点にない限り、物体の運動を拘束できる。最後に、 $n_p = 5$ のときは、 $J_p$ は $6 \times 5$ の行列になり、 $\text{rank} J_p = 5 = n_p$ となって、物体の運動を拘束出来る。

## 4. 擬似非駆動関節を有する双腕マニピュレータによる物体の運動制御

本節では、擬似非駆動関節を有する双腕マニピュレータを用いて、物体を操ることを考える。ただし、この双腕マニピュレータは3.節で示した必要十分条件を満たすものとする。

### 4.1 擬似非駆動関節の制御

ここでは、物体を操る際の擬似非駆動関節の運動について考察する。前述したように、擬似非駆動関節はその軸にトルクが加わらないような姿勢を保つ。もし、使用しているマニピュレータの関

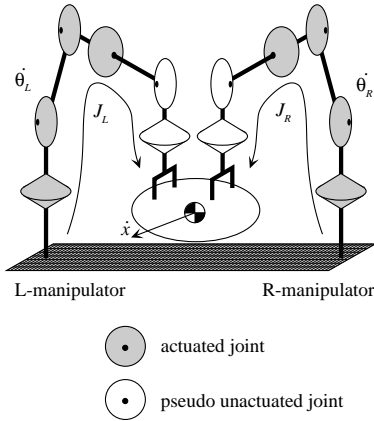


Fig. 9 Handling of an object by dual manipulators with pseudo-unactuated joints

節がDDアーム等のようにback drivabilityを持っているのであれば、擬似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出来、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の小さい関節である場合は、トルクが加わらない姿勢にその関節を能動的に制御する必要がある。ここで、その関節にトルクが加わらない姿勢というのは、2節で述べた方法により求めることが出来るのでその角度になるように制御すれば良い。

## 4.2 駆動関節の制御

ここでは、物体を駆動関節のみで操るための駆動関節の角速度と物体の速度との関係について述べる。まず、Fig.9に示すような擬似非駆動関節を有する一般的なマニピュレータを用いた双腕協調ハンドリングを考える。Fig.9において、左側のマニピュレータ(以下、Lマニピュレータと呼ぶ。)の関節角度ベクトルを $\theta_L(\in R^{n_L})$ 、右側のマニピュレータ(以下、Rマニピュレータと呼ぶ。)の関節角度ベクトルを $\theta_R(\in R^{n_R})$ とする。但し、両マニピュ

レータとも作業空間に対し十分な自由度を持ち、 $m \leq n_L$ ,  $m \leq n_R$ であるとする。次に、把持物体の位置/姿勢を表す一般化座標を $x(\in R^6)$ とすると、次式が成り立つ。

$$\dot{x} = J_L \dot{\theta}_L = J_R \dot{\theta}_R \quad (15)$$

式(15)において、Lマニピュレータにおける擬似非駆動関節の成分を右辺に、Rマニピュレータにおける駆動関節の成分を左辺に移項し、次式を得る。

$$J_a \dot{\theta}_a = J_u \dot{\theta}_u \quad (16)$$

ここで、 $J_a$ ,  $J_u$ は両マニピュレータのヤコビ行列の列ベクトルの内、それぞれ駆動関節、擬似非駆動関節に対応した列ベクトルからなる行列である。同様にして、 $\theta_a$ ,  $\theta_u$ は両マニピュレータの関節角度の内、それぞれ駆動関節、擬似非駆動関節の角度から成っている。ここで、前節で述べた必要十分条件が満足されていると仮定すると、擬似非駆動関節角速度と駆動関節角速度には、次式の関係が成り立つ。

$$\dot{\theta}_u = J_u^+ J_a \dot{\theta}_a \quad (17)$$

ここで、 $J_u^+$ は $J_u$ が正方行列のときは逆行列、それ以外のときは擬似逆行列である。この関係を用いると、L, Rマニピュレータの関節軸角速度を駆動関節軸角速度で以下のように表すことが出来る。

$$\dot{\theta}_L = C_L \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ \dot{\theta}_u \end{bmatrix} = C_L \begin{bmatrix} I_{n_a} \\ J_u^+ J_a \end{bmatrix} \dot{\theta}_a \quad (18)$$

$$\dot{\theta}_R = C_R \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ \dot{\theta}_u \end{bmatrix} = C_R \begin{bmatrix} I_{n_a} \\ J_u^+ J_a \end{bmatrix} \dot{\theta}_a \quad (19)$$

ここで、 $C_L$ ,  $C_R$ はそれぞれ $\theta_a$ と $\theta_u$ から $\theta_L$ ,  $\theta_R$ に対応する成分を選択するための行列であり、 $I_{n_a}$ は $n_a$ を駆動関節の数としたときの $n_a \times n_a$ の単位行列である。よって式(15), (18), (19)より、把持物体の速度と駆動関節軸角速度との関係は次式で示される。

$$\dot{x} = J_L C_L \begin{bmatrix} I_{n_a} \\ J_u^+ J_a \end{bmatrix} \dot{\theta}_a = J_R C_R \begin{bmatrix} I_{n_a} \\ J_u^+ J_a \end{bmatrix} \dot{\theta}_a \quad (20)$$

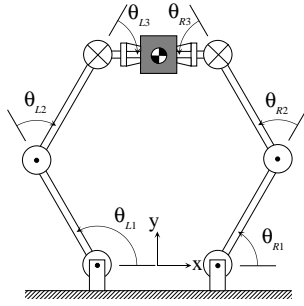


Fig. 10 Handling of an object by dual-manipulators with pseudo-unactuated joints

式(20)の関係を用いて、速度分解制御系を構成することにより、物体の運動を制御できる。

## 5. シミュレーション

本節では4節で導出した関係式を用いて、Fig.10に示すような各々の3軸を擬似非駆動関節とした平面3自由度マニピュレータによる双腕協調において、手先に目標軌道を与え、そのときの駆動関節の運動から生成される手先の軌道を求めた。このとき、両マニピュレータの1, 2リンクの長さを2[m], 3軸から把持物体の中心までの距離を1[m]とする。また、左右のマニピュレータの関節軸角度ベクトルを各々  $\theta_L \in R^3$ ,  $\theta_R \in R^3$  としたとき、その初期角度を  $\theta_L = [\pi/3, \pi/3, \pi/3]^T$ ,  $\theta_R = [2\pi/3, -\pi/3, -\pi/3]^T$  とする。そのときの把持物体のx座標、y座標の軌道と姿勢の軌道をそれぞれFig.11, 12, 13に示す。これらの結果より、目標の軌道と計算された軌道はほぼ一致しているということが分かる。

## 6. おわりに

本稿では、まず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察し、手先に荷重が加わったことにより関節に発生するトルクが、マニピュレータの姿勢を変化させることによって、主に許容負荷の小さい関節軸には生じないよ

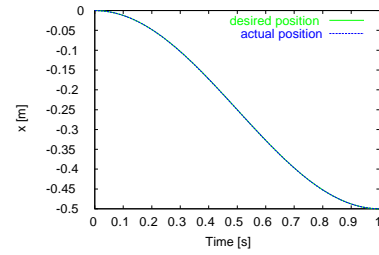


Fig. 11 Trajectory of direction of x axis

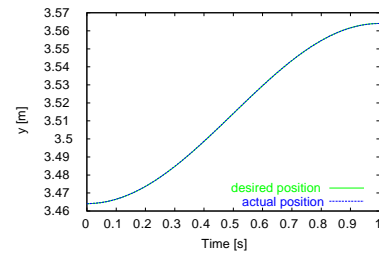


Fig. 12 Trajectory of direction of y axis

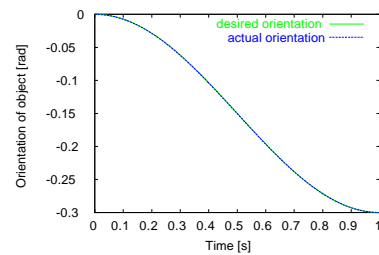


Fig. 13 Trajectory of object orientation

うに出来ることを示した。しかし、このときに許容負荷の小さい関節軸の角度は手先の力/モーメントに依存してしまうため、任意に操ることが出来なくなってしまう。これは、マニピュレータの自由度が減少したことを意味し、このため複雑な作業が出来なくなってしまう。そこで次に、失われた自由度を補う方法として、擬似非駆動関節を有するマニピュレータによる双腕協調を提案した。その際に、擬似非駆動関節を有していても、物体の全自由度を操れるために物体の運動を完全に拘束するための必要十分条件を示した。また、物体の

運動を制御するために必要な，物体の速度と駆動関節角速度間のヤコビ行列を導出し，シミュレーションによりその有効性を示した．

## 参考文献

- 1) 牧野 洋: ロボットの需要と供給, 日本ロボット学会誌, 13-6, 736/739, (1995)
- 2) 稲葉 肇: 産業用ロボットと作業環境, 日本ロボット学会誌, 17-5, 637/642, (1999)
- 3) 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, 1234/1240 (1999)
- 4) 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, 2392/2397 (2000)
- 5) 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, 1228/1233 (1999)
- 6) 美多 勉, 大須賀 公一: ロボット制御工学入門, 27, コロナ社(1989)