

非駆動ジョイントをもつマニピュレータの 投げる動作における省エネルギー軌道*

佐藤 治** 佐藤浅次*** 高橋伸弥† 河野通夫†

Trajectory for saving energy of a Manipulator with Passive Joint in Throwing Motion

Osamu SATO, Asaji SATO, Nobuya TAKAHASHI and Michio KONO

For the purpose of enlarging the work space of manipulator, this study proposes the trajectories for saving energy about throwing motion. In this paper, equations of motion of a manipulator, whose mechanism has two actuated joints and a passive revolute joint for a tray, are derived in consideration of characteristics of driving source. In order to prevent the object falling from the tray, the passive joint for the tray is rotated by inertia force about actuated joints. Considering the condition about motion of the tray, trajectories for saving energy of two actuated joints are calculated by iterative dynamic programming. Initial searching region of dynamic programming is a shape which is surrounded by two cosine-wave translated in parallel. This proposed searching region is used as an initial range of the iteration method, and the region is shifted to minimize the energy consumption of the motor. The dynamic characteristics of manipulator controlled based on above mentioned trajectory are analyzed theoretically and investigated experimentally.

Key words: direct-drive-manipulator, trajectory, dynamic-programming, dc-motor, minimum-energy, throwing motion

1. 緒 言

投げる動作に関しては、作業空間を広げることを目的としてグリッパを遠方に投げて行う物体の捕獲・回収（キャスティングマニピュレーション）を行った例¹⁾、1自由度マニピュレータによる物体放り投げ操作を行った例²⁾、あるいは2自由度ロボットの投球動作の目標位置誤差を扱った例³⁾がある。しかしいずれの場合も駆動源消費エネルギーの評価は十分ではなく、モータの過電流防止等に有効な省エネルギー化は考慮していない。

著者らはPTP制御において、動的計画法⁴⁾の探索領域を移動させながら繰り返し探索する方法（Iterative Dynamic Programming method: 以降IDP法と略記する）によって求めた2自由度マニピュレータの省エネルギー軌道の有効性を確認している⁵⁾。また種々の形状の対象物を扱うハンドとしてはトレイ型が適しており、対象物を投げる距離が短い場合については、著者らはすでにリンク先端に固定したトレイを用いた場合⁶⁾の省エネルギー軌道の有効性を確認している。

本研究では機構の軽量化のためにベース上のモータからリンクを介して動力を伝達する2自由度機構の先端に、非駆動ジョイントを介してトレイを取り付けたマニピュレータを用いて、対象物を投げる作業を行う場合について、距離と作業時間の変化に柔軟に対応した省エネルギー軌道を検討している。

非駆動関節に関しては、鉛直面内において2軸および3軸マニピュレータに関する研究例⁷⁾⁸⁾があるが、いずれも根本関節を非駆動としており、マニピュレータ先端軌道の制御が困難であるため、搬送作業を対象とはしていない。また非駆動関節をもつマニピュレータの障害物回避の運動計画法を提案した例⁹⁾があるが、これは水平面内の運動であり、鉛直面内の運動は扱

っていない。

そこで本報では、鉛直面内で運動するマニピュレータ先端に非駆動ジョイントを介してトレイを取り付けたモデルを用いて、対象とする物体を投げる際の省エネルギー軌道をIDP法で求め、その特徴を理論ならびに実験解析によって明らかにする。

2. マニピュレータのモデル化

図1に示すような閉ループ形機構のマニピュレータを鉛直面内で運動させる場合について考える。マニピュレータ先端にはトレイが取り付けられている。駆動源として用いるベース上の二つの直流サーボモータの出力軸は同一直線上にあり、出力軸には閉ループ形機構のリンクが直結してある。

ジョイントの角度を θ_j ($j=1\sim 3$)で表す。 θ_1, θ_2 はベース上にあるモータ出力軸に直結したリンクの角度であり、 θ_3 はトレイの角度である。トルクを τ_j ($j=1\sim 3$)で表す。ただし、トレイが非駆動のとき $\tau_3=0$ である。マニピュレータの運動方程式は次のようになる。

$$\tau_j = A_{j1}\ddot{\theta}_1 + A_{j2}\ddot{\theta}_2 + A_{j3}\ddot{\theta}_3 + A_{j4}, \quad (j=1\sim 3) \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A_{11} &= a_1, A_{12} = a_4 \cos(\theta_1 - \theta_2), A_{13} = a_5 \cos(\theta_1 - \theta_3) \\ A_{14} &= a_4 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + a_5 \dot{\theta}_3^2 \sin(\theta_1 - \theta_3) + a_7 \cos \theta_1 \\ A_{21} &= A_{12}, A_{22} = a_2, A_{23} = a_6 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ A_{24} &= a_4 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 - \theta_1) + a_6 \dot{\theta}_3^2 \sin(\theta_2 - \theta_3) + a_8 \cos \theta_2 \\ A_{31} &= a_5 \cos(\theta_3 - \theta_1), A_{32} = a_6 \cos(\theta_3 - \theta_2), A_{33} = a_3 \\ A_{34} &= a_5 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_3 - \theta_1) + a_6 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_3 - \theta_2) + a_9 \cos \theta_3 \\ a_1 &= I_1 + I_4 + m_1 l_{g1}^2 + m_3 l_1^2 + m_4 l_{g4}^2 + (m_5 + m_L) l_1^2 \\ a_2 &= I_2 + I_3 + m_2 l_{g2}^2 + m_3 l_{g3}^2 + m_4 l_2^2 + (m_5 + m_L) l_3^2 \\ a_3 &= I_5 + m_5 l_{g5}^2 + m_L l_5^2, a_5 = (m_5 l_{g5} + m_L l_5) l_1 \\ a_4 &= m_3 l_1 l_{g3} + m_4 l_2 l_{g4} + (m_5 + m_L) l_1 l_3 \\ a_6 &= (m_5 l_{g5} + m_L l_5) l_3, a_9 = (m_5 l_{g5} + m_L l_5) g \end{aligned}$$

* 原稿受付 平成19年9月5日

** 正会員 宮崎大学工学部 (宮崎市学園木花台西1-1)

*** 正会員 都城工業高等専門学校 (都城市吉尾町473-1)

† 宮崎大学工学部 (宮崎市学園木花台西1-1)

$$a_7 = \{m_1 l_{g1} + m_3 l_1 + m_4 l_{g4} + (m_5 + m_L) l_1\} g$$

$$a_8 = \{m_2 l_{g2} + m_4 l_2 + m_3 l_{g3} + (m_5 + m_L) l_3\} g$$

非駆動ジョイントをもつマニピュレータの場合は、式(1)において $\tau_3 = 0$ とおき、 $\tau_1, \tau_2, \dot{\theta}_3$ を未知数とした次式を解くことにする。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -A_{13} \\ 0 & 1 & -A_{23} \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}\dot{\theta}_1 + A_{12}\dot{\theta}_2 + A_{14} \\ A_{21}\dot{\theta}_1 + A_{22}\dot{\theta}_2 + A_{24} \\ -A_{31}\dot{\theta}_1 - A_{32}\dot{\theta}_2 - A_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

モータ内部のクーロン摩擦によるトルクを $\tau_{fj} (j=1\sim 3)$ 、モータの電機子巻線の抵抗を R_{aj} 、電機子の慣性モーメントを I_{mj} 、粘性摩擦係数を D_{mj} とすればインダクタンスの影響が小さいときモータの入力電圧 e_j は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$e_j = b_{1j} \dot{\theta}_j + b_{2j} \ddot{\theta}_j + b_{3j} \tau_j + b_{3j} \tau_{fj} \cdot \text{sign}(\dot{\theta}_j) \quad (3)$$

ただし、 $b_{1j} = k_{vj} + \frac{R_{aj} D_{mj}}{k_{tj}}, b_{2j} = \frac{R_{aj} I_{mj}}{k_{tj}}, b_{3j} = \frac{R_{aj}}{k_{tj}}$

電機子電流 i_{aj} は $i_{aj} = \frac{e_j - k_{vj} \dot{\theta}_j}{R_{aj}}$ (4)

である。作業時間 T 内にモータが消費するエネルギー

$$E = \sum_{j=1}^3 \int_0^T (e_j \cdot i_{aj}) dt \quad (5)$$

を評価量として用いる。ただし、非駆動ジョイントをもつマニピュレータの場合はベース上のモータ ($j=1, 2$) だけを考慮する。

3. 対象物の分離速度

図1に示すようなマニピュレータにおいて、図2に示す位置 (x_f, y_f) から角度 ϕ の方向に速度 v で分離した対象物が目標位置 (x_d, y_d) に到達するために必要な速度は

$$v = \frac{x_d - x_f}{\cos \phi} \sqrt{\frac{g}{2(x_d - x_f) \tan \phi - 2(y_d - y_f)}} \quad (6)$$

速度 \dot{r} を

$$\dot{r} = [v \cos \phi \quad v \sin \phi \quad \dot{\theta}_3]^T$$

とすると、リンクの角速度 $\dot{\theta}$ は

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{r} \quad (7)$$

ただし、 $J = \begin{bmatrix} -l_1 S_{f1} & -l_3 S_{f2} & -l_5 S_{f3} \\ l_1 C_{f1} & l_3 C_{f2} & l_5 C_{f3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$$C_{fj} = \cos \theta_{fj}, \quad S_{fj} = \sin \theta_{fj}, \quad (j=1\sim 3)$$

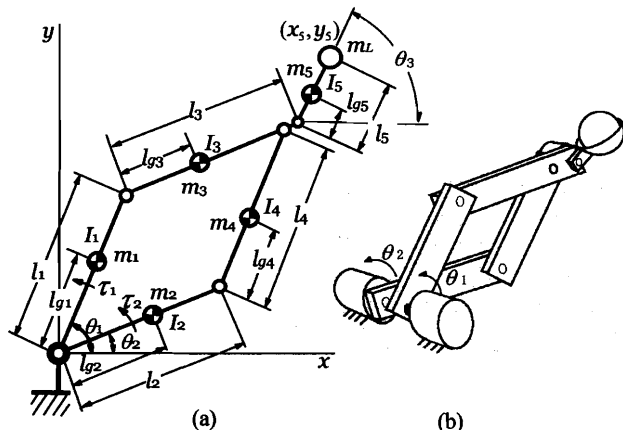


Fig. 1 Mechanism of manipulator

$\theta_{fj} (j=1\sim 3)$: 対象物分離時の角度

である。以降のシミュレーションにおいては目標位置と分離位置を条件として、分離位置でのモータに直結したリンクの角速度を式(6), (7)を用いて求めることにする。

また本報では、 (x_d, y_d) より遠方に投げることを想定しており、以降 $y_d = 0$ とし、 x_d を到達距離とよぶことにする。

4. 最適軌道の探索

図3に示すような角度、角速度、時間の3次元空間内で最適軌道を探索する。角度の軸方向の探索点数を N とするとき、駆動軸が1軸増えるごとに、探索候補の組み合わせの数が N^3 倍ずつ増加する⁵⁾。したがって、従来の動的計画法¹¹⁾のように N を100以上の十分な値にすると計算時間が長くなる問題がある。そこで計算時間短縮を目的に N の値を小さくし、図4の流れ図に示すような、探索領域を移動しながら繰り返し探索するIDP法を用いる。 $N=5\sim 7$ に設定してIDP法を用いれば、従来の動的計画法に比べて1/10~1/100以下の計算時間で探索が可能である⁹⁾。作業開始位置の角度を θ_{ij} 、分離時の角度を θ_{fj} とするとき、探索の初回の軌道として以下の式を用いる。

$$\dot{\theta}_j = A_j t + B_j \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) + \dot{\theta}_{ij} \quad (8)$$

$$\theta_j = \theta_{ij} + \dot{\theta}_{ij} t + \frac{1}{2} A_j t^2 + \frac{T B_j}{\pi} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right) \quad (9)$$

ただし、

T : 作業開始から分離までの時間 (作業時間)

$$A_j = \frac{\dot{\theta}_{fj} - \dot{\theta}_{ij}}{T}, \quad B_j = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\theta_j}{T} - \frac{\dot{\theta}_j}{2}\right)$$

$$\theta_j = \theta_{fj} - \theta_{ij}, \quad \dot{\theta}_j = \dot{\theta}_{fj} + \dot{\theta}_{ij}$$

この軌道を、IDP法の初回の探索において、探索領域の中心の軌道とし、探索を繰り返すごとにモータの消費エネルギーが減少する方向に探索領域を移動させる(図5参照)。

$$\theta_j = \theta_{ij} + \dot{\theta}_{ij} t + \frac{1}{2} A_j t^2 + \frac{T B_j}{\pi} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right) \pm \Delta \theta_{ij} \frac{N-1}{2} \quad (10)$$

この繰り返し計算する方法の有効性は2自由度マニピュレータのPTP制御においてはすでに確認されている⁹⁾。

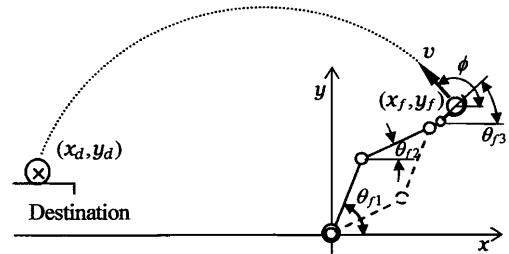


Fig. 2 Throwing motion of manipulator

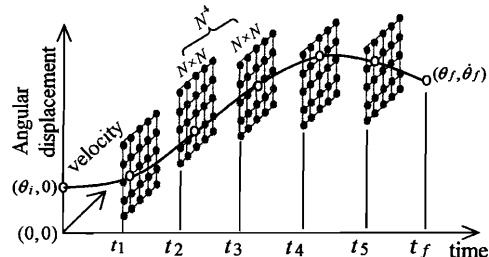


Fig. 3 Dynamic programming method

本報では、探索領域の終了位置で最大速度となる場合を扱っており、非駆動ジョイントに作用する慣性力の影響が大きい場合について、この探索法の有効性を検討する。

5. 対象物に働く慣性力

マニピュレータの投げる動作において、トレイは種々の形状の対象物を扱うのに適しており、著者らはすでに、対象物落下を抑制するために必要なトレイ駆動用モータの駆動入力を求める方法⁹⁾を明らかにしている。

本報では省エネルギー化の観点から、2軸駆動のマニピュレータ先端に非駆動ジョイントを介してトレイを取り付けた場合を想定し、図6に示すような扇形の側面をもつ可動式のトレイを質量 m_3 のリンク(Link 3)に取り付けて用いる。ただし対象物質量の変化にかかわらず、トレイの最適重心位置が変化しないようにするために、トレイを取り付けたジョイント上に対象物の重心を設定している($l_s=0$)。

トレイに対象物を載せた状態でマニピュレータが加速度運動するとき、対象物に作用する慣性力 F が x 軸となす角度 α は次

のようになる。

$$F_x = -m_L \ddot{x}_s, F_y = -m_L (\ddot{y}_s + g), \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \quad (11)$$

ただし \ddot{x}_s, \ddot{y}_s は加速度の水平方向、鉛直方向の各成分であり、次のようになる。

$$\ddot{x}_s = -l_1 C_1 \dot{\theta}_1^2 - l_1 S_1 \ddot{\theta}_1 - l_3 C_2 \dot{\theta}_2^2 - l_3 S_2 \ddot{\theta}_2$$

$$\ddot{y}_s = -l_1 S_1 \dot{\theta}_1^2 + l_1 C_1 \ddot{\theta}_1 - l_3 S_2 \dot{\theta}_2^2 + l_3 C_2 \ddot{\theta}_2$$

ただし、 $S_j = \sin \theta_j, C_j = \cos \theta_j, (j=1, 2)$

対象物落下を抑制するためには、作業開始から分離までの時間内に α が $(\theta_3 - \lambda/2)$ と $(\theta_3 + \lambda/2)$ の範囲内にあるように制御すればよい。ただし、 λ はトレイの扇形の角度である。

6. シミュレーション

マニピュレータの諸量を表1のように定め、シミュレーションを行う。なおトレイ駆動用モータの質量は考慮しておらず、 m_3, l_3 はトレイ角度計測器を取り付けた場合を想定している。

6.1 分離位置と消費エネルギーの関係

対象物の分離位置と駆動源消費エネルギーの関係を図7に示している。なお到達距離が長くなるにつれて最適分離位置が顕著に現れるので $x_d = -2.0$ mとしている。図中の黒四角印の近傍において駆動源の消費エネルギーが小さくなるため、この分離位置を以下のシミュレーションに用いる。

6.2 3軸駆動の場合の解析

2軸駆動に必要な条件を検討するために、まず3軸駆動の解析を行う。その分離時および目標位置に関する条件を

$$\theta_{i1} = -\pi/4, \theta_{i2} = -\pi/2, \theta_{i3} = -\pi/2,$$

$$\theta_{f1} = 13\pi/36, \theta_{f2} = \pi/6, \theta_{f3} = -\pi/8, \phi = 3\pi/4,$$

とし、トレイをモータ3で駆動した場合のシミュレーション結果を図8に示している。式(7)を用いて求めた分離時刻における角速度($\dot{\theta}_{f1} = 13.9$ rad/s, $\dot{\theta}_{f2} = 12.8$ rad/s, $\dot{\theta}_{f3} = 0$)を条件とし、IDP法の探索点数を $N=5$ とし、式(10)の軌道を初期値として角度分割幅 $\Delta\theta_j$ を0.3 radから0.02 radになるまで繰り返し計算を行っており、2軸駆動の場合⁹⁾よりも100倍以上の計算時間を要している。なお対象物の落下防止の条件(後述の図9(b))を考慮してモータ3を駆動している。図中の軌跡はマニピュレータ(リンク1と3)と対象物の位置を0.02秒間隔で示したものであり、作業開始直後の時計回りで位置エネルギーを蓄え、その後の運動に利用する軌道となっている。そのときのモータ駆動軸の応答を図9(a)に示しており、図9(b)にトレイ上の対象物に働く慣性力の向き α (実線)、トレイの角度 θ_3 (一点鎖線)、および $(\theta_3 - \lambda/2)$ と $(\theta_3 + \lambda/2)$ (破線)を示している。なお、分離時刻前の対象物落下抑制と分離時刻の対象物の運動を妨げない条件を考慮して $\lambda = \pi/2$ とし、 $|\theta_3 - \alpha| \geq (\lambda/2)$ の場合には、式(5)の評価量を

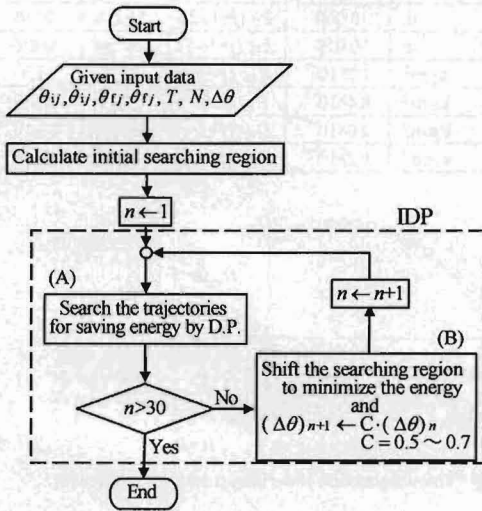


Fig. 4 Flow chart for simulation

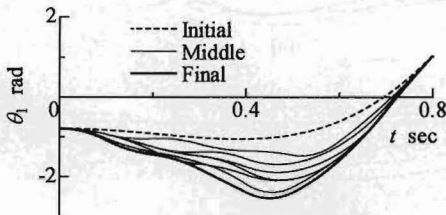


Fig. 5 Trajectory for searching

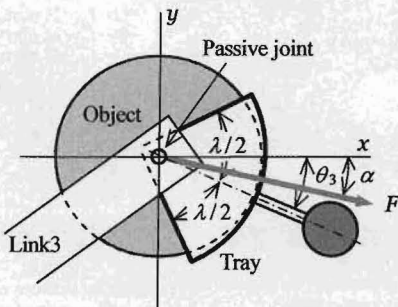


Fig. 6 Force which act on the object on the tray

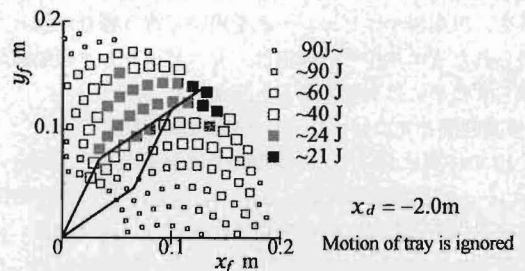


Fig. 7 Relation between consumed energy and release point

$$E' = \sum_{j=1}^3 \int_0^T (e_j \cdot i_{a_j}) dt + k \{ \theta_3 - \alpha - (\lambda/2) \} \quad (5')$$

に置き換え、対象物のトレイからの落下を抑制している。ただし、 k は重み係数であり、 $k=0.2$ としている。

対象物に働く慣性力の向き α (実線) は作業開始から分離時刻 0.8 秒まで破線の内側にあり、対象物が落下しない条件を満たしている。分離時刻までのモータ 3 の消費エネルギーは 0.2 J 以下であり、消費したエネルギーの和は $E \approx 9.1 J$ であった。

6.3 2軸駆動におけるトレイの最適な重心位置

2軸駆動のマニピュレータ先端に非駆動ジョイントを介して取り付けたトレイの軌道を、慣性力によって調整可能にするためのトレイの重心位置をシミュレーションによって求めた結果、その範囲は $0.018 \text{ m} \leq l_{g5} \leq 0.07 \text{ m}$ であった。この範囲内において最適な重心位置を求めることにする。

初期条件および放出時の条件を図 8 と同じに定め、モータ 1, 2 のみを駆動する場合において、作業時間 T 、重心位置 l_{g5} および到達距離と消費エネルギーの関係を図 10 に示している。なお対象物の分離時刻における対象物のトレイからの分離条件は $(\theta_{f3} < -\pi/8, \dot{\theta}_{f3} < 0)$ としている。図 10(a)において、作業時間が 0.7 秒と 0.8 秒の場合には $l_{g5} = 0.028 \text{ m}$ において消費エネルギーは最小となっている。また図 10(b)において、到達距離 $|x_d|$ の増加とともにトレイの最適重心位置 l_{g5} は増加する傾向が見られる。以上の結果より、作業条件に応じて作業時間およびトレイの重心位置 l_{g5} を調整する必要があり、図 8 の作業条件では $T=0.8$ 秒、 $l_{g5} = 28 \text{ mm}$ の値が適していることが分かった。

6.4 2軸駆動の場合の解析

トレイの重心位置を $l_{g5} = 28 \text{ mm}$ 、対象物の分離条件を $(\theta_{f3} < -\pi/8, \dot{\theta}_{f3} < 0)$ とし、作業条件を図 8 と同じに定め、モータ 1, 2 のみを駆動した場合のシミュレーション結果を図 11, 12 に示している。この場合の IDP 法の計算に要する時間は、PTP 制御を行った場合⁵⁾とほぼ同じである。図 11 中の軌跡はマニピュレータ (リンク 1, 3, トレイ) と対象物の位置を 0.02 秒間隔で示したものであり、図 8 の場合と同様に、作業開始直後の時計回りで位置エネルギーを蓄え、その後の運動に利用する軌道となっている。図 12(d)に、トレイ上の対象物に働く慣性力の向き α (実線)、トレイの角度 θ_3 (一点鎖線)、および $(\theta_3 - \lambda/2)$ と $(\theta_3 + \lambda/2)$ (破線) を示している。図 9(b)の場合と同様に、対象物に働く慣性力の向き α (実線) は作業開始から分離時刻 0.8 秒まで破線の内側にあり、対象物落下防止の条件を満たしている。この場合のモータ 1, 2 の消費エネルギーの和は、図 8 の場合とほぼ同じく $E \approx 9.1 J$ であり、トレイをモータで駆動しなくても、図 9 (3軸駆動の場合)と同様の作業が可能である。なおマニピュレータから対象物が分離する時刻において、マニピュレータの機構の運動エネルギーは 0.54 J、対象物の運動エネルギーは約 0.02 J (機構の運動エネルギーの約 3%) である。エネルギー効率はやが低い、本研究では急加速・急減速をともなう投げる作業を、汎用のマニピュレータを用いて行う場合を扱っており、得られた省エネルギー軌道は、マニピュレータ駆動源の負荷を減らすためには有効であると考えられる。

6.5 作業時間とマニピュレータ先端経路の関係

図 11, 12 の作業において、作業時間だけを変化させた場合のマニピュレータ先端経路を図 13(a)に示している。作業時間 $T=0.6$ 秒において作業開始時の運動が時計回り (振り運動) になる傾向が現れ、作業時間の増加とともにその傾向は顕著になっている。図 13(b)にトレイの動きを無視した場合 (対象物落下

防止の条件を無視した場合) のマニピュレータ先端経路を示している。図(b)の場合は図(a)の場合に比べて全体的に消費エネルギーは小さいが、消費エネルギーが最小となる最適な作業時間 ($T=0.8$ 秒) においてはその差は 5%以内におさまっている。図

10 の特性を考慮してトレイの最適な重心位置 l_{g5} を定めれば、トレイの動きを無視した場合に比べ、消費エネルギーは僅か数%の増加で、対象物の落下防止が可能であることが分かった。

図 13(a)の経路のそれぞれの場合について、ベースジョイントと非駆動ジョイント間の距離の変化は図 14 のようになっている。分離時刻前の対象物落下抑制と分離時刻の対象物の運動を妨げないトレイの運動を実現する慣性力を生み出すためには、図 14 に示すように、ジョイント間の距離が必然的に変化する。これが 1 自由度回転機構の投げる動作とは異なる特徴である。

Table 1 Parameters of the manipulator

Parameter	Value	Parameter	Value
l_1, l_2, l_4	m	m_1, m_2	kg
l_3	0.080	m_3	0.020
l_5	0.115	m_4	0.047
l_{g1}, l_{g2}	m	m_5	0.022
l_{g3}	0.044	m_L	0.018
l_{g4}	0.078	$k_{tj} (j=1\sim3)$	kg
l_{g5}	0.040	$k_{vj} (j=1\sim3)$	Nm/A
I_1, I_2	kgm ²	$R_{aj} (j=1\sim3)$	0.046
I_3	1.7×10 ⁻⁵	$T_{fj} (j=1\sim3)$	Vs/rad
I_4	8.4×10 ⁻⁵	$D_{mj} (j=1\sim3)$	Ω
I_5	2.0×10 ⁻⁵	$I_{mj} (j=1\sim3)$	Nm
			0.013
			7.9×10 ⁻⁵
			8.5×10 ⁻⁶

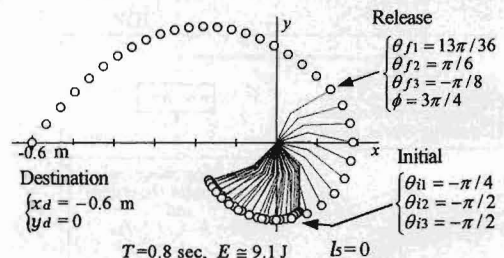


Fig.8 Throwing motion of the manipulator (θ_3 is actuated).

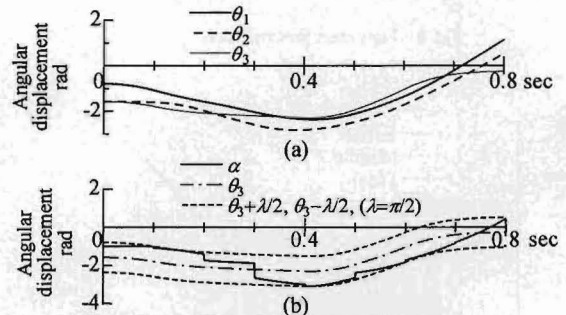


Fig.9 Response of the manipulator (θ_3 is actuated).

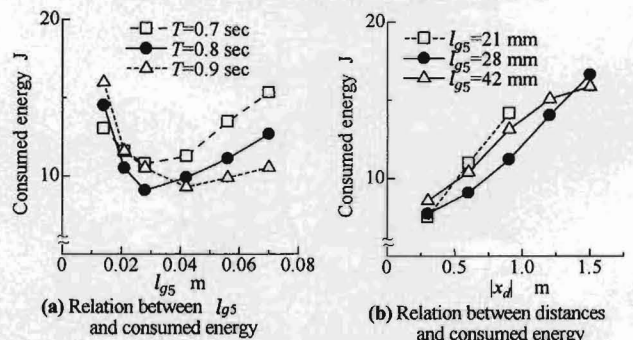


Fig. 10 Influence about center of gravity of tray

7. 実験

7.1 実験装置および実験方法

図 15 に示すような外観の装置を製作した。その諸量は表 1 の 2 軸駆動の部分と同じである。モータ 1, 2 (定格 24 V, 60 W) の出力軸にリンクを直結して鉛直面内で運動させている。またトレイはマニピュレータ先端に非駆動ジョイントを介して取り付けられている。パーソナルコンピュータから出力した制御電圧信号を D/A 変換(12bit)してモータに印加している。モータ駆動電流は測定用抵抗 (1Ω) を回路に直列に入れ、その両端の電位差を A/D 変換(12bit)ボードから取り込んで求めている。リンク 1, 2 の角変位はモータ軸に直結したロータリエンコーダ (分解能 $\pi/2000$ rad) で、トレイの角変位はトレイの回転軸に直結したロータリエンコーダ (分解能 $\pi/1000$ rad) で計測している。モータの制御と角変位および駆動電流の計測は 2/1000 秒の間隔で行っている。なお、トレイの重心位置はボルト・ナットによって変更可能となっている。

7.2 実験結果

図 16 はマニピュレータの投げる動作を周期 0.02 秒で発光させたフラッシュ照明下で撮影したものである。図 11 に示したシミュレーション結果と同様に対象物はトレイから分離し、その後目標到達位置に向かって放物運動を行っている。

図 12 に示した最適な速度軌道の場合の実験結果は図 17(a) ($|x_d|=0.6$ m) のようになる。ここで電圧の実験値 (実線) は理論値 (破線) にフィードバック制御の電圧を加えたものを示している。分離時刻 0.8 秒までは図 12 と同様の省エネルギー軌道であり、分離後は、境界条件を変えて、同じアルゴリズムで新たに求めた停止までの省エネルギー軌道を目指軌道として、角度ゲイン (50V/rad) 角速度ゲイン (0.5Vs/rad) でフィードバック制御を行っている。図 17(b) は $|x_d|=0.4$ m の実験結果であり、図 17(a), (b) のいずれの場合においても、トレイの角度 θ_3 の実験結果 (実線) と理論結果 (破線) の差は 10% 以内である。またダイレクトドライブで駆動しているためモータの逆起電力の影響が小さく、駆動電圧 e_1 と電流 i_{a1} の波形は類似しており、それらの実験結果 (実線) と理論結果 (破線) はほぼ一致し、電流の増加が抑制されている。分離時刻 (0.8 秒) 以降においても、角速度 $\dot{\theta}_1$ と $\dot{\theta}_2$ 、角度 θ_3 の実験結果は理論結果と類似しており、モータ 1, 2 の消費エネルギーの和 E も分離時刻 (0.8 秒) までの範囲では、実験と理論結果はほぼ一致している。

図 17(a) に示した実験を 10 回繰り返した場合について、対象物が実際に到達した座標を x とするとき、対象物の到達距離 ($|x_d|=0.6$ m) に対する誤差 $\Delta x = |x| - |x_d|$ の割合と、分離時刻における角速度の設定値 ($\dot{\theta}_{f1}=13.9$ rad/s, $\dot{\theta}_{f2}=12.8$ rad/s) に対する誤差 $\Delta \dot{\theta}_j = \dot{\theta}_j - \dot{\theta}_{fj}$ ($j=1, 2$) の割合を図 18 に示している。トレイに保持された対象物の重心は非駆動ジョイントの位置に設定されているため、モデル化した式においては、駆動軸の角速度 ($\dot{\theta}_{f1}$, $\dot{\theta}_{f2}$) によって分離時の対象物の速度が定まる。角速度の誤差は -2% (6/1000 秒間に角度計測用エンコーダの 1 ステップの角度変化) 以内であり十分小さい。これに対して到達距離の誤差は 2~6% となっている。これは分離時刻直後のトレイの回転による影響が現れたものと考えられる。

以上の理論ならびに実験解析結果から、省エネルギー軌道の有効性とモデル化の有効性を確認することができた。

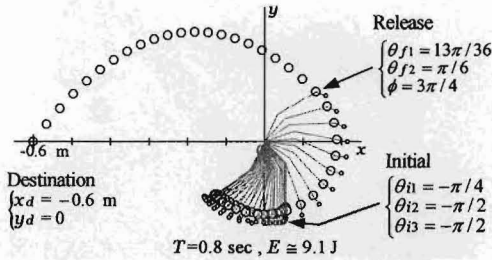


Fig.11 Throwing motion of manipulator with passive joint

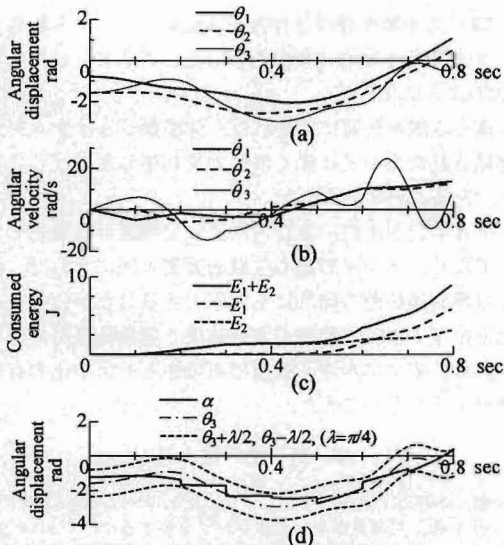
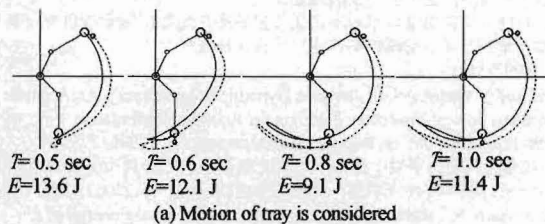
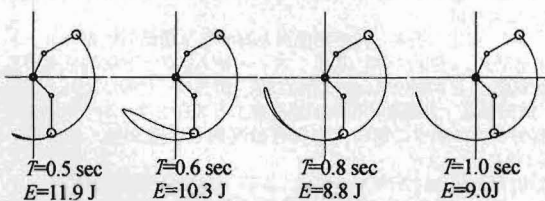


Fig.12 Response of the manipulator with a passive joint



(a) Motion of tray is considered



(b) Motion of tray is ignored

Fig.13 Locus of the throwing motion

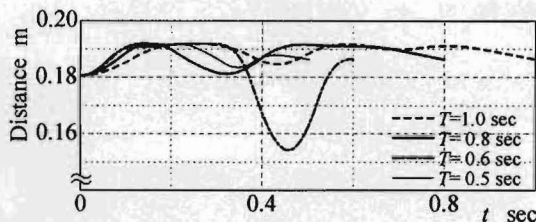


Fig.14 Distance between base joint and passive joint

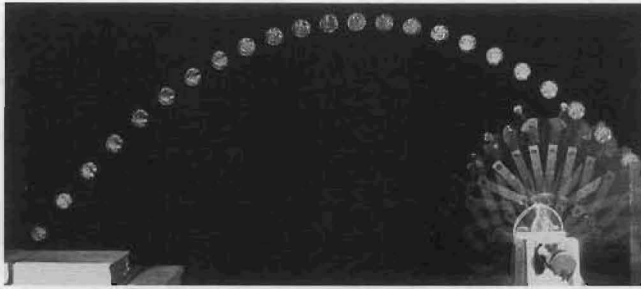


Fig. 16 Throwing motion of manipulator ($|x_d| = 0.6 \text{ m}$)

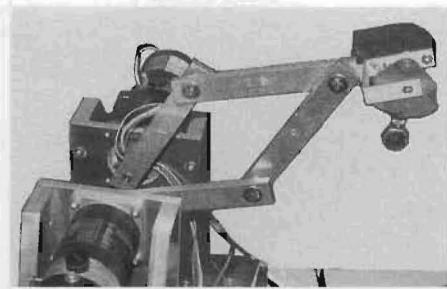


Fig. 15 Experimental apparatus

8. 結 言

本研究では、対象物を投げる作業を非駆動ジョイントをもつマニピュレータで行う場合の解析を行った。得られた結果をまとめれば次のようになる。

- (1) トレイ重心位置を最適に定めれば、非駆動ジョイントを介して連結されたトレイに働く慣性力を利用した投げる作業が可能であることが分かった。
- (2) 非駆動ジョイントを用いることによって機構が軽量化できるだけでなく、トレイの重心位置を変更可能にすれば、対象物の目標到達距離の増加にも対応できることが分かった。
- (3) 対象物を投げるまでの範囲で実験結果と理論結果がほぼ一致しており、省エネルギー軌道の有効性とモデル化の有効性を確認することができた。

参 考 文 献

- 1) 有岡, 神徳, 小森谷: キャスティングマニピュレーションに関する研究, (第1報, 可変長ひも状柔軟リンクを有するマニピュレータの提案とそのスイング制御法), 日本機械学会論文集(C編), **64**, 626, (1998)3854.
- 2) 田畑, 相山: 1自由度マニピュレータによる物体放り投げ操作, 日本ロボット学会誌, **20**, 8, (2002)876.
- 3) 加藤, 中村: 2自由度ロボットによる投球動作制御に関する研究 (適応制御とオンライン分離時刻修正), 日本機械学会論文集(C編), **63**, 614, (1997)3571.
- 4) G. Field and Y. Stepanenko: Iterative Dynamic Programming: An Approach to Minimum Energy Trajectory Planning for Robotic Manipulators, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1996)2755.
- 5) 佐藤, 佐藤, 河野, 甲斐: 重力下でPITP制御される2自由度D.Dマニピュレータの省エネルギー軌道, 精密工学会誌, **69**, 9, (2003)1281.
- 6) A.Sato, O.Sato, N.Takahashi, M.Kono: Trajectory for saving energy of a direct-drive manipulator in throwing motion, Artificial Life and Robotics, **11**, 1, (2007)61.
- 7) 小島, 三友, 和田, 坂本: 非駆動関節を有する2関節形鉄棒ロボットに関する研究, (逆動力学に基づくフィードフォワード制御を適用した運動制御), 日本機械学会論文集(C編), **57**, 539, (1991)2291.
- 8) 析欣, 兼田雅弘: 非駆動の根本関節を有する3自由度ロボットの振り上げ制御とその動きの解析, 計測自動制御学会論文集, **42**, 10, (2006)1133.
- 9) 城間直司, Kevin M.LYNCH, 荒井, 谷江: 非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータの障害物回避運動計画, 日本機械学会論文集(C編), **66**, 642, (2000)545.
- 10) 神谷, 関, 疋津, 酒井: DCサーボモータの動特性に関する考察, 精密工学会誌, **65**, 3, (1999)464.
- 11) 佐藤, 下嶋, 四十願: 2自由度搬送機の最小エネルギー制御, 日本機械学会論文集(C編), **51**, 466, (1985)1290.

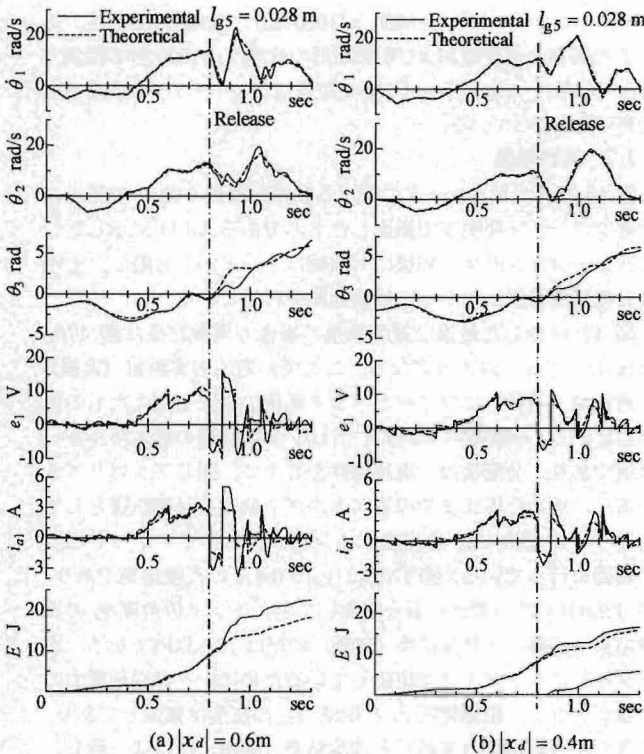


Fig. 17 Experimental results

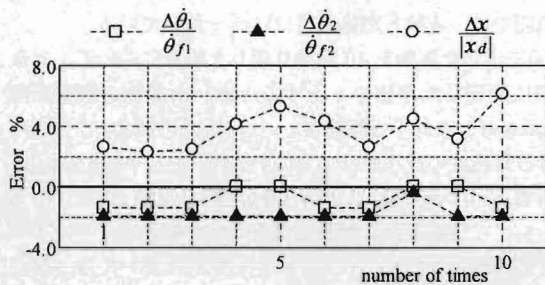


Fig. 18 Relation between error of angular velocity and distance