

非駆動関節と低剛性リンクを有するマニピュレータの 動特性シミュレーション*

鈴木 聡一郎^{*1}, 森 谷 優^{*1}
山 田 元^{*2}, 加 藤 信 彦^{*3}

Simulation of Dynamic Characteristics of Manipulator Equipped with Passive Joint and Low-Rigidity Link

Soichiro SUZUKI, Masaru MORIYA,
Gen YAMADA and Nobuhiko KATO

In this paper, we describe the dynamic characteristics of a two-link manipulator which equipped with a passive joint and a low-rigidity link. This manipulator is composed of high- and low-rigidity links which are connected by a passive joint and an electromagnetic brake. The purpose of this structural feature is to harness the elastic strain energy of the low-rigidity link and the inertia of the system itself. From the viewpoint of energy efficiency, the performance of this manipulator was evaluated analytically in terms of the energy efficiency index, i.e., the ratio of the kinetic energy of the payload to the work load of the driving motor. Also the carrier efficiency index was estimated as the ratio of the energy efficiency index to the working time required. As a result, in terms of working efficiency, this manipulator was compared with a typical two-link horizontal manipulator in various conditions of motion. It was clarified that the energy efficiency index strongly depends on the initial angle of the passive joint.

Key Words: Simulation, Manipulator, Motion Control, Low-Rigidity Link, Passive Joint, Energy Efficiency Index

1. 緒 言

産業用ロボットアームの普及に伴い、動作の高速化や省力化ならびに本体の小形・軽量化への要求がますます高まっている。またこれらに加え、作業の高精度化に対する要求もあることから、本体重量に対して可搬重量が小さすぎるといふ指摘もある。産業用ロボットアームの多くは、各関節に駆動用アクチュエータが一つずつ対応しているハードウェア構成が一般的である。これに対し、小形・軽量化ならびに動作の省力化やコストダウンなどを目的として、非駆動関節を用いたロボットアームの研究が報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、人間の運動能力をロボットで実現することを目的として、非駆動関節を有する鉄棒ロボットのフィードフォワード制御に関する研究も行われている⁽⁴⁾。

著者らは、第2関節を非駆動関節とし、第2リンクの先端側の剛性を低く設定した水平二リンクマニピュレータの動特性について、理論的な検討と実験による検証を行った⁽⁵⁾。この結果、動作の高速化を図ること

を目的として、低剛性部の曲げ振動位相と非駆動関節に設置した保持ブレーキを解放する時刻の関係を明らかにした。このマニピュレータの構造は、人間の動作の中でも道具を使いこなしていると表現されるような、効率のよい動作をロボットで実現することを目標としている。例えば、ある道具の使用に熟練している人間が、その弾性を有効に利用することで、能動的に発揮する関節トルクが大きくないにもかかわらず、結果として大きな効果を得ている場合がある。身近ではプロゴルファーや釣りの名人がゴルフクラブのシャフトや釣りざおの弾性を有効に利用している例がある。このような、道具と身体を効果的に利用した運動スキルをマニピュレータの機構ならびに制御に導入することを試みた。その中でも、動作の高速化を図るという点で、水平二リンクマニピュレータでの実現の可能性を示唆した。このことは、同時に速度指令による作業では、省力化への効果が期待できることとなる⁽⁶⁾。ここでいう省力化とは、定められた動作に対してアクチュエータに要求される発生トルクや仕事をより小さくすることを表す。

本報では、このような構造上の特徴をもつマニピュレータの動作の省力化を図るといふ観点から、動特性をシミュレーションする。その結果、さまざまな動作

* 原稿受付 1996年5月13日。

^{*1} 正員, 北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

^{*2} 正員, 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13西8)。

^{*3} 学生員, 北見工業大学大学院 [現: 日本電信電話(株)]。

設定におけるエネルギー効率指数と搬送効率指数について検討し、省力化に適した設定を見いだすことを目的とする。さらに、一般的な構造のマニピュレータや剛体リンクと非駆動関節で構成されるものについてもモデル化し、作業効率指数を比較する。これらのことから、省力形マニピュレータとしての可能性に関して検討を加える。

2. モデル化

2.1 力学モデル 図1に、非駆動関節と低剛性リンクを有するマニピュレータのモデルとその座標系を示す。ここで、

- M_1, M_2 : 第1, 第2リンクの質量
- I_1, I_2 : 各関節まわりのリンクの慣性モーメント
- L : 第1リンクの長さ
- a : 第2リンク剛体部の長さ
- E : 第2リンク低剛性部のヤング率
- I : 第2リンク低剛性部の断面二次モーメント
- ρ_3 : 第2リンク低剛性部の密度
- A_3 : 第2リンク低剛性部の断面積
- l : 第2リンク低剛性部の長さ
- M_p : ペイロードの質量
- r_p : ペイロードの半径
- I_p : ペイロードの重心まわりの慣性モーメント

である。第1リンクは剛体として取扱ひ、固定座標系 $O-XY$ の原点を中心に回転し X 軸とのなす角を θ_1 とする。第2リンクは剛性の異なる二つの部分から構成されるものとし、関節側を剛体、先端側を低剛性リンクとみなす。このリンクに回転座標 $O'-xy$ を設定し、先端にペイロードを取付ける。第2リンクの剛体部は、ブレーキ機構のみの第2関節を中心に回転するものとし、 X 軸とのなす角を θ_2 とする。

一方、比較対象として剛体リンクの各関節にアクチュエータを有する一般的な構成のもの、二つの剛体リンクを非駆動関節により連結し、一つのアクチュエータで駆動する構成の二種類のマニピュレータを設定

する。これらの剛体リンクは、本報で取扱うマニピュレータのリンクと同じ長さ、質量、慣性モーメントとする。また、これらの比較対象はある搬送作業に対する作業効率指数を比較検討するためのものであり、アクチュエータやブレーキ機構の質量ならびに慣性モーメントなどの違いについては、取扱わないこととする。このため、3種類のマニピュレータの構成上の違いは、リンクが剛体であるか否か、ならびに第2関節に入力トルクがあるか否かの二点のみとなる。

2.2 数学モデル 設定した力学モデルについて、ハミルトンの原理を適用し、運動方程式を導出する。第1関節の駆動トルクを $Q_1(t)$ 、第2関節のブレーキトルクを $Q_2(t)$ とすると、以下に示す各関節に関するモーメントの釣合い式が得られる⁽⁶⁾。

$$\begin{aligned}
 & J_1\ddot{\theta}_1 + J_2\ddot{\theta}_2 + C_1\dot{\theta}_2^2 + M_p L_c \ddot{y}_p \\
 & + \rho_3 A_3 L_c \int_0^l \ddot{y} dx - Q_1(t) = 0 \dots\dots\dots (1) \\
 & J_2\ddot{\theta}_1 + J_3\ddot{\theta}_2 - C_1\dot{\theta}_1^2 + M_p(a+l+r_p)\ddot{y}_p \\
 & + I_p\ddot{y}'_p + \rho_3 A_3 \int_0^l (a+x)\ddot{y} dx - Q_2(t) = 0 \\
 & \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

同様に、低剛性リンクに関するたわみ振動方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
 & \rho_3 A_3 \ddot{y} + EI y'''' + EIC \dot{y}'''' \\
 & + \rho_3 A_3 \{L_c \ddot{\theta}_1 + (a+x)\ddot{\theta}_2\} = 0 \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

式中、 C はひずみ速度比例形の内部減衰係数であり、 $(\dot{\quad})$ は時間での微分を、 (\quad) は x での微分を表す。ただし、用いた記号は、以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 & L_c = L \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2), \quad L_s = L \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
 & y = y(x, t), \quad y_l = y(l, t), \quad y_p = y_l + r_p y'_l \\
 & M = L + a + r_p \\
 & J_1 = I_1 + M_2 L^2 + \rho_3 A_3 L^2 l + M_p L^2 \\
 & J_2 = \left\{ \frac{1}{2} M_2 a + \rho_3 A_3 l \left(a + \frac{l}{2} \right) + M_p M \right\} L_c \\
 & + M_p L_s y_p \\
 & J_3 = I_2 + \rho_3 A_3 l \left(\frac{l^2}{3} + al + a^2 \right) + M_p M^2 \\
 & + I_p + M_p y_p^2 \\
 & C_1 = M_p M L_s - M_p y_p L_c
 \end{aligned}$$

低剛性リンクの振動変位を先端に質量を有する減衰のない片持ばりの固有関数 $\phi_i(x)$ と時間関数 $q_i(t)$ を用いて、

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \dots\dots\dots (4)$$

と近似する。ここで、片持ばりの i 次の固有振動数を ω_i とすると、固有関数 $\phi_i(x)$ は、以下のように表せる。

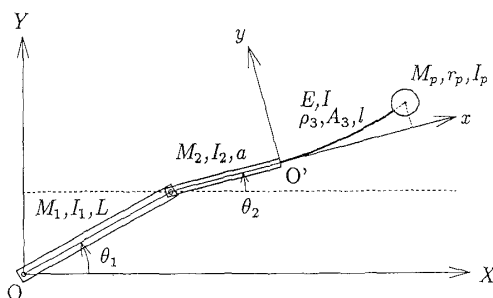


Fig. 1 Coordinate system of manipulator

$$\begin{aligned} \phi_i(x) &= a \cos k_i x + b \sin k_i x + c \cosh k_i x \\ &\quad + d \sinh k_i x \\ k_i^4 &= (\rho_3 A_3 / EI) \omega^2 \end{aligned}$$

式(4)を式(1)~(3)に適用し、二次振動成分まで考慮することにより、状態方程式は次のように導かれる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + Cn \dots\dots\dots(5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} x &= \{q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, \theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2\}^T \\ u &= \{Q_1, Q_2\}^T \\ n &= \{\theta_1^2, \theta_2^2\}^T \end{aligned}$$

であり、係数行列 A, B, C は以下に示すように、それぞれ $8 \times 8, 8 \times 2, 8 \times 2$ の行列となるが、その詳細は省略する。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{61} & 0 & a_{63} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{81} & 0 & a_{83} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} \\ 0 & 0 \\ b_{61} & b_{62} \\ 0 & 0 \\ b_{81} & b_{82} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} \\ 0 & 0 \\ c_{41} & c_{42} \\ 0 & 0 \\ c_{61} & c_{62} \\ 0 & 0 \\ c_{81} & c_{82} \end{bmatrix}$$

3. シミュレーション

3.1 動作パターン このマニピュレータでは、効率のよい動作を実現するため、非駆動関節まわりの動力的干渉と、第2リンクの低剛性部の弾性ひずみエネルギーの有効利用に着目する。このため、1回の搬送作業につき、動作中は非駆動関節に設置した保持ブレーキのONからOFFへの切り替えは一度のみ行うこととする。このことから、次に示す二つの動作パターンについてエネルギー効率指数を比較することで省力化に適した動作設定を検討する。

動作1: 各関節の初期角度を設定した後、第2関節のブレーキをかけた状態で、第1関節の駆動を開始する。その後、ある時刻で第2関節のブレーキを解放し、同時に第1リンクを停止させる。最終的に所望の位置で第2リンクも停止させる。

動作2: 第2関節のブレーキを解放している状態から第1関節の駆動を開始し、ある時刻で第2関節のブレーキをかけ、第1リンク、第2リンクともに同じ角速度で回転させる。その後、動作1と同じ制御を行う設定とする。

3.2 エネルギー効率指数 二つの動作パターンに対して、さまざまな設定条件を与え、エネルギー効率指数を求める。これにより、本報で取扱うマニピュレータの動作の省力化に適する設定を検討する。ここでは、モデルに対してすべてのエネルギー収支を考慮するのではなく、駆動時のアクチュエータの仕事に対して、ペイロードが効率よく搬送されているか否かについて着目する。したがって、各リンクの運動エネルギーや低剛性リンクの弾性ひずみエネルギーならびに摩擦などの非保存力の影響については考慮しない。これらのことから、第1関節の駆動用アクチュエータが、第2関節のブレーキ解放までに行う仕事を W_M 、ブレーキ解放後のペイロードの運動エネルギーを E_p とし、エネルギー効率指数 η を次式のように表す。

$$\eta = E_p / W_M \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

$$W_M = \int_{\theta} Q(t) d\theta \dots\dots\dots(7)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \{M_p(a+l+r_p)^2 + I_p\} \bar{\theta}_2^2 \dots\dots\dots(8)$$

ブレーキ解放後の第2関節の角度変化は、低剛性リンクの振動の影響を受け周期的に変動する。このため最小二乗法を用いて平均角速度を算出し、これをこれを $\bar{\theta}_2$ とする。この値を求めて式(8)を計算し、 E_p を求める。

なお、本報では3種類の効率指数について検討するが、いずれの場合も第1関節の駆動用アクチュエータの最大発生トルクは $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、第2関節の保持ブレーキあるいはアクチュエータの場合は $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ という条件のもとに加減速を行う。

3.3 搬送効率指数 エネルギー効率指数のみに着目してマニピュレータの動作の省力化を図ると、駆動角速度に制限を加えることになり、結果的に作業能率の低下を招く危険がある。そこで、エネルギー効率指数が高くかつ短時間で目標地点にペイロードが到達することを表す搬送効率指数を導入する。まず、設定された動作でペイロードが目標地点に到達するまでの搬送時間を $T_1 \text{ s}$ とする。さらに動作速度の大小を判断する基準として、第1関節への指示駆動角速度と等しい角速度で第2関節が回転したと仮定する場合の搬送作業時間 $T_2 \text{ s}$ を用いる。 T_2 に対する T_1 の比を搬送効率指数を導入することで、指示動作の終点位置に

かかわらず動作速度を犠牲にすることなく省力化が図れる設定を見出すことができる。 T_1 と T_2 の比で表される時間に関する無次元量を T として、搬送効率指数 λ を以下のように表す。

$$T = T_1/T_2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\lambda = \eta/T \dots\dots\dots (10)$$

3・4 作業効率指数 エネルギー効率指数ならびに搬送効率指数を大きくする動作設定を行うことで、アクチュエータの仕事が小さいにもかかわらず、ペイロードのすばやい移動が可能となる。しかしながら、実際の搬送作業では位置決めならびに制振時のアクチュエータの仕事とそれに要する時間が無視できなくなる。本報で取扱うマニピュレータは、低剛性リンクの弾性振動を利用しており、比較対象よりもこの点で不利であると考えられる。そこで、制振も含めた位置決め時のアクチュエータの仕事と、目標地点に到達し停止するまでの時間も考慮した作業効率指数を導入し、比較対象を含め3種類のマニピュレータについて検討する。2種類の比較対象については、3・2節で記述したアクチュエータならびにブレーキの最大発生トルク以下で減速、停止するものとする。低剛性リンクを有するマニピュレータについては、極配置法を用いた状態フィードバック制御で位置決めを行う。この場合、動作の省力化と高速化の点から、非駆動関節のブレーキ解放後はできるだけ目標位置まで第2関節をそのまま回転させるのが望ましい。そのため、第2関節の位置決めを非駆動関節のブレーキで行った後、アクチュエータにより低剛性リンクの制振とそれに伴う第1関節の微小位置決めを行うレギュレータ構成とした。ここで、アクチュエータが駆動時に行う仕事を W_M 、位置決め時に行う仕事を W_B 、第2関節が回転し始めた後、加速終了から減速開始までのペイロードの運動エネルギーを E_p とする。さらに、駆動開始から位置決め終了までに要した時間を T_{carry} 、無次元化するための基準時間を T_{base} として、作業効率指数 γ を以下のように表す。

$$\gamma = E_p \cdot T_{base} / \{(W_M + W_B) \cdot T_{carry}\} \dots\dots\dots (11)$$

4. 解析結果および考察

4・1 動作パターンおよび設定の決定 エネルギー効率指数 η および搬送効率指数 λ について2種類の動作パターンを基本として、さまざまな設定を与えて比較する。この二つの指数ともに高い値を示す動作設定が、低剛性リンクと非駆動関節を有するマニピュレータの動作の省力化に適していると考えられる。シミュレーションする際の、各動作における θ_1 の初期

値は0 radに設定する。また、すべての動作設定において、第1関節の指示駆動角速度は、特に指定しない限り $\pi/2$ rad/sとする。さらに第2関節のブレーキ解放時刻は、以下の条件により設定する。既報⁽⁵⁾では、ブレーキ解放後の第2リンクの平均角速度を、より高速化する動作設定の条件を明らかにした。第2関節のブレーキ解放時刻を Tb とし、これに対するブレーキ解放後の第2リンクの平均角速度の変化と、この時刻における低剛性リンクの先端変位について解析した結果を図2に示す。

この結果、駆動開始後、低剛性リンク先端の振動変位が正へ零クロスする時刻で、第2関節のブレーキを解放すると角速度が最大になることがわかる。さらに、先端変位が最小、零、最大となる時刻でブレーキを解放した場合の、第2関節の角度変化を解析した結果を図3に示す。これより第2関節の角度は、低剛性リンクの振動の影響を受け、周期的に変動しているのが認められる。このことから角速度が最大になるときの低剛性リンクの振動変位は、最小となることがわかる。これらの結果から、上述の動作設定は、リンクの弾性を最も効果的に利用していると考えられる。そこで、エネルギー効率指数および搬送効率指数について比較する場合も、駆動開始後、低剛性リンク先端の振動変位が、初めに正へ零クロスする時刻で第2関節のブレーキを解放することとする。なお、マニピュレー

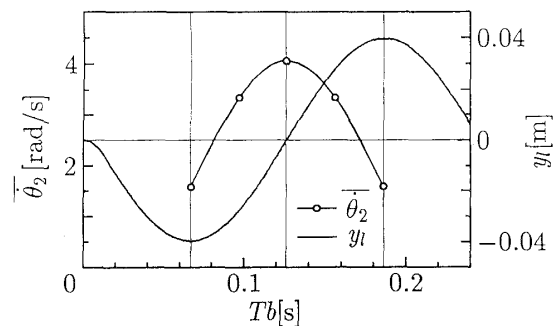


Fig. 2 Variation of angular velocity

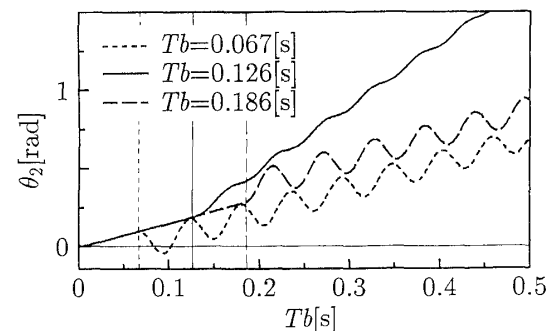


Fig. 3 Simulation of manipulator motion

Table 1 Parameter of manipulator for simulation

	Link1	Link2	Low-Rigidity Link	Payload
Length(m)	0.202	0.101	0.30	—
Mass(kg)	1.979	0.393	0.032	0.157
Moment of Inertia(kg·m ²)	3.36×10^{-2}	8.25×10^{-4}	—	1.19×10^{-5}
Radius(m)	—	—	—	0.012
Young's Modulus(N/m ²)	—	—	7.15×10^{10}	—
Second Moment of Area(m ⁴)	—	—	1.33×10^{-11}	—

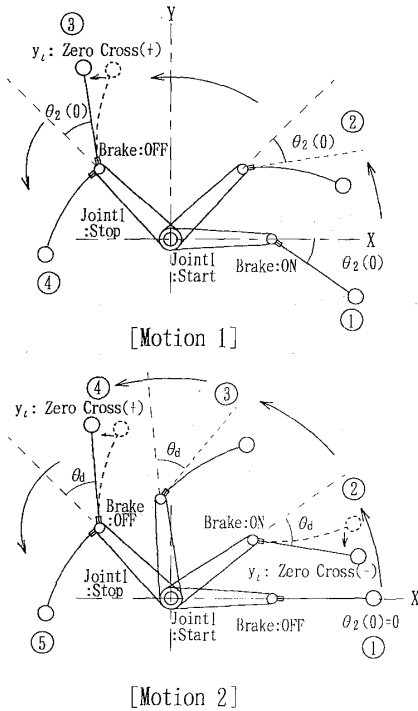


Fig. 4 Illustration of carrying motion

タの諸元は表1に示すとともに、設定された動作の略図を図4に示す。

動作1に対するシミュレーションでは、 θ_2 の初期角度を $\theta_2(0)$ として、これを0 radから $-3\pi/4$ radまで $\pi/20$ 間隔で変化させる。これらの $\theta_2(0)$ に対するエネルギー効率指数 η を求めた結果を図5に示す。

次に動作2のパターンで行う場合は、 $\theta_2(0)$ の設定を0 radにし、第1および第2関節の角度差を θ_d とする。駆動開始後あらかじめ設定した θ_d で第2関節のブレーキをかけた後、動作1と同じタイミングでブレーキを解放する。この動作のねらいは、初期駆動トルクを小さくすることである。 θ_d の設定は $\pi/10$ radから $7\pi/10$ radまでの間を、 $\pi/10$ 間隔で分割した角度に最も近く、なおかつ低剛性リンクの先端変位が負へ零クロスするときの角度とした。これは、ブレーキをかけたときに低剛性リンクの先端変位が、負の方向へ増加しなければ、その弾性ひずみエネルギーを有効に

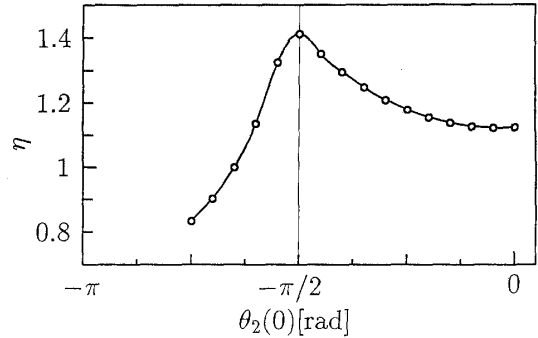


Fig. 5 Variation of energy efficiency index (motion 1)

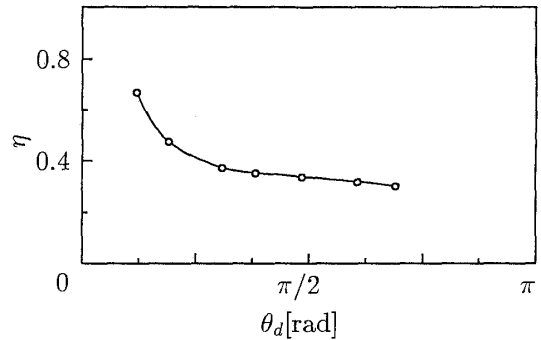


Fig. 6 Variation of energy efficiency index (motion 2)

利用できなくなるためである。以上の設定で、 η を求めた結果を図6に示す。

図5で得られた結果から、動作1の場合は、第2関節の初期角度 $\theta_2(0)$ が $-\pi/2$ radのとき、エネルギー効率指数が最大になることが示された。このことは、以下に示す理由によると考えられる。 $\theta_2(0)$ の角度設定が異なると、第1関節まわりのリンクの慣性モーメントが変化し、 $\theta_2(0)$ の設定を0 rad以下とした場合、その値が小さいほど慣性モーメントは小さくなる。この場合、駆動時にアクチュエータが発生するトルクが異なるため、ブレーキ解放までの仕事は異なることとなる。一方、ブレーキ解放後のペイロードの運動エネルギーは、 $\theta_2(0)$ が0 radの場合に最大となる。これ

は、駆動開始直後の低剛性リンクの曲げ振動変位が最も大きく、その結果ブレーキ解放後の第2関節の角速度が最大になる。エネルギー効率指数はこれらの要因で変化し、結果的にこれらの中間的な値である $-\pi/2$ rad で最大になったことによる。

図6で示される動作2の結果と比較すると、動作1の効率指数がすべての場合で上回っている。動作1に比べ動作2の初期駆動トルクは、第2関節のブレーキが解放されているため小さくなる。しかしながら、その後ブレーキをかけ、再度ブレーキを解放するまでの間に、結局アクチュエータの仕事が増大してしまう。このことが原因となり、動作2のエネルギー効率指数が、全体的に低下したと考えられる。これらのことから、対象とするマニピュレータは、非駆動関節である第2関節の初期角度を $-\pi/2$ rad に設定し、ブレーキをかけた状態で駆動開始する動作が、省力化に対する効果が高いと考えられる。

次にこの結果をもとに、動作1のパターンに対して、 $\theta_2(0)$ を $-\pi/2$ rad に固定し、指示駆動角速度を $\pi/4$ rad/s から $3\pi/4$ rad/s まで $\pi/8$ 間隔で変化させる。一方、 $\theta_2(0)$ は同様の設定で、ペイロードの質量を五種類設定した場合について η を求めた。ここで指示駆動角速度の基準値を $\pi/2$ rad/s に設定し、 $\dot{\theta}_1$ をこの値で割った角速度に関する無次元量を $\dot{\theta}_b$ とする。同様に、ペイロードの質量の基準値を 0.157 kg とし、 M_p をこの値で割り M_b とする。 $\dot{\theta}_b$ ならびに M_b に対する η の変化を図7に示す。

$\eta - \dot{\theta}_b$ 曲線から、駆動角速度を変えても η はさほど変化しないことがわかる。これは、駆動角速度を速くしても、アクチュエータの仕事の増加に対し、ブレーキ解放後のペイロードの運動エネルギーが、同程度の比率でしか大きくならないことを示している。一方、 $\eta - M_b$ 曲線は右上がり傾向を示している。このことから、ペイロードを重くするほど、アクチュエータの

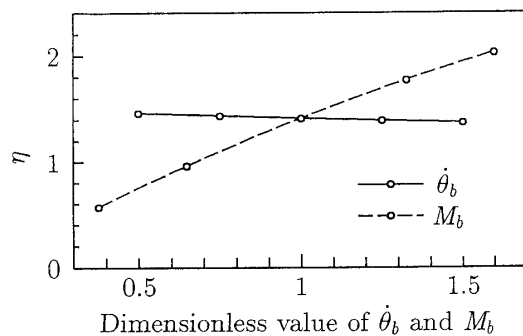


Fig. 7 Comparison of the change of energy efficiency index

仕事の増加に対して、ブレーキ解放後のペイロードの平均角速度の増大への効果が、より大きくなることがわかる。これは、ペイロードが重い場合、駆動時の低剛性リンクの変位が大きくなることがおもな原因であると考えられる。変位が大きいと、初期駆動トルクはペイロードに比例せず低減される。さらに、低剛性部の弾性ひずみエネルギーの一部が、ペイロードの運動エネルギーに変換されるため、角速度を向上させる効果がある。これらのことから、ペイロードが重いほど、効率指数が高い結果になったと考えられる。このことは、対象とするロボットアームが、重量物を搬送するのに適した構造であることを示している。また、どちらの曲線についても、この設定においては明確な極値が認められないことから、省力化するうえで最適な $\dot{\theta}_1$ や M_p は特に存在しないと考えられる。この点を明らかにするため、基本設定の範囲よりペイロードの質量と駆動角速度を大きく設定したときの最大駆動トルクについて、剛体リンクの場合と比較する。どちらの場合も $\theta_2(0)$ は $-\pi/2$ rad に設定し、駆動時の第1関節のアクチュエータの最大発生トルクを T_{MAX} とする。駆動角速度を π rad/s に固定しペイロードの質量を 0.8 から 2.0 kg に設定した場合の T_{MAX} を図8に示す。また、ペイロードの質量を 0.8 kg に固定し、駆動角速度を $\pi/2$ から 2π rad/s に設定した場合を図9に示す。

これらの結果から、低剛性リンクの振動変位が駆動トルクを低減する効果は、ペイロードの質量と駆動角速度が大きいくほど有効であることが確認できた。さらに T_{MAX} は、 $\theta_2(0)$ が 0 rad に近づくほど剛体リンクとの差が大きくなることが容易に予想できる。

搬送効率指数 λ は、動作1のパターンにおいて2地点間でペイロードの搬送を行うことを想定して、比較検討する。ペイロードを運搬する始点と終点は、二つの関節角により規定する。 $-\pi/10$ rad から 0 rad ま

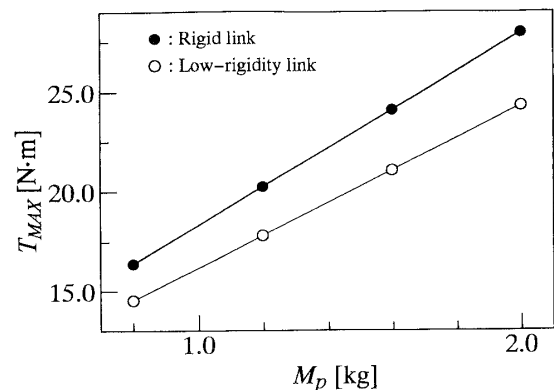


Fig. 8 Comparison of driving torque in various M_p

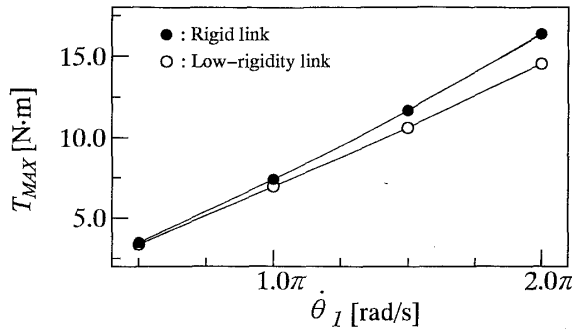


Fig. 9 Comparison of driving torque in various $\dot{\theta}_1$

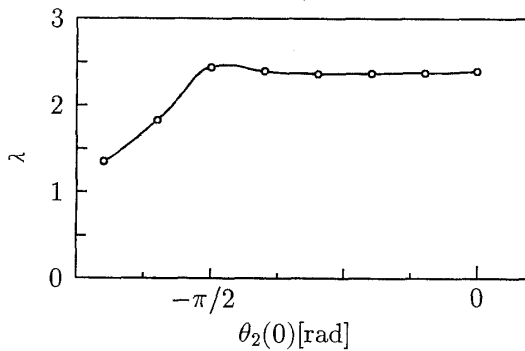


Fig. 10 Variation of carrier efficiency index (motion 1)

で $\pi/10$ 間隔で $\theta_2(0)$ の設定を変え、各関節の駆動角度の合計が $\pi/2$ rad になるところをそれぞれの始点に対する終点と定める。これらの設定による運搬作業に対する λ を求めた結果を図 10 に示す。

搬送効率指数 λ は、動作 1 においてある始点から終点へ短時間で、なおかつ効率よくペイロードを搬送する能力を表しているといえる。この結果から、 λ は η と同様に $\theta_2(0)$ が $-\pi/2$ rad の場合に最も高い値となることがわかる。また $\theta_2(0)$ が、 $-\pi/2$ rad と 0 rad の間の角度では、 λ の変化が少ない。これは、 $\theta_2(0)$ の設定が 0 rad に近づくほど、ブレーキ解放後の第 2 関節の角速度が速くなり、アクチュエータの仕事が増加する反面、搬送時間が短くなっているためと考えられる。

エネルギー効率指数と搬送効率指数を検討した結果から、このマニピュレータの動作を省力化するためには、動作 1 のパターンを用いて $\theta_2(0)$ を $-\pi/2$ rad に設定することが有効であると考えられる。

4.2 作業効率指数の比較 このマニピュレータに適した動作設定が決定できたため、2.2 節に記述した 2 種類のマニピュレータと作業効率指数 γ を比較し、実際に搬送作業を行う場合、低剛性リンクと非駆動関節の組合せが、有効であるか検討する。一般的な

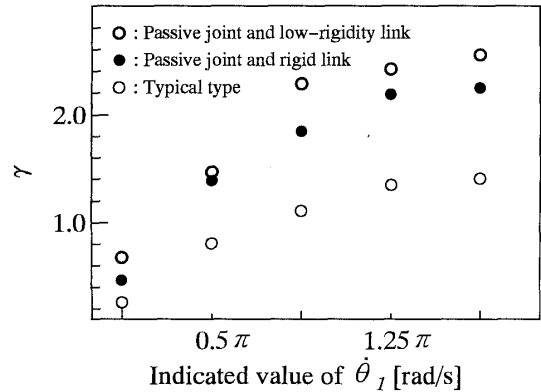


Fig. 11 Comparison of working efficiency index

マニピュレータの第 2 関節の駆動トルクは、次のように定める。低剛性リンクを有するマニピュレータの場合、駆動角速度に対して第 2 リンクの平均角速度は速くなる。図 2 の結果から、アームの弾性を最も有効に利用した場合、約 2.6 倍となることがわかる。この平均角速度と、各リンクを剛体として取扱う、一般的なマニピュレータの第 2 リンクの角速度を等しく設定する場合、第 2 リンクの回転を加速する必要がある。この加速に必要なトルクを、第 2 関節に駆動トルクとして与えることとする。

低剛性リンクを有するマニピュレータの位置決め制御は、 $\theta_1, \dot{\theta}_1, q_1, \dot{q}_1$ を状態変数として、離散時間系のレギュレータを極配置法により構成する。弾性リンクの内部減衰係数を 7.0×10^{-4} s、サンプリング周波数を 200 Hz に設定し、高次スピルオーバーが発生せず、なおかつ比較的良好な制御性能が得られる極として、 $0.89 \pm 0.09j, 0.83, 0.82$ を選定した。第 1 関節の指示駆動角速度を $\pi/8$ rad/s から $13\pi/8$ rad/s まで $3\pi/8$ 間隔で変化させる。二つの関節角度が等しくなったところを目標地点とした場合の γ を図 11 に示す。また、その詳細として各設定での作業時間とアクチュエータの仕事、ならびに対象とするマニピュレータのアクチュエータの総仕事を W_0 、一般的なものについては W_T としてその比を表 2 に示す。ここで、非駆動関節と剛体リンクで構成される比較対象を P. R. type とし、非駆動関節と低剛性リンクの構成を P. L. type と略記する。なお、 T_{base} の値は $\pi/8$ rad/s で対象とするマニピュレータを駆動した場合の T_1 に相当する 2.21 s に設定した。

図 11 の結果から、非駆動関節と低剛性リンクを有するマニピュレータは、他の 2 種類のマニピュレータと比較して、 γ の値が高くなることが示された。表 2 に示されるように、対象とするマニピュレータは位置

Table 2 Details of working efficiency index

θ_1 (rad/s)		$\pi/8$	$\pi/2$	$7\pi/8$	$5\pi/4$	$13\pi/8$
T_{carry} (sec)	Typical type	2.24	6.88×10^{-1}	4.86×10^{-1}	3.95×10^{-1}	3.71×10^{-1}
	P. R. type	4.04	1.16	7.81×10^{-1}	6.13×10^{-1}	5.69×10^{-1}
	P. L. type Carry Control	2.21 7.0×10^{-1}	6.56×10^{-1} 7.35×10^{-1}	4.36×10^{-1} 6.70×10^{-1}	3.44×10^{-1} 7.20×10^{-1}	2.95×10^{-1} 6.95×10^{-1}
$W_M + W_B$ (J)	Typical type (W_T)	2.79×10^{-2}	4.61×10^{-1}	1.45	3.05	5.32
	P. R. type	4.54×10^{-3}	8.55×10^{-2}	2.91×10^{-1}	6.49×10^{-1}	1.19
	P. L. type Carry Control (W_o)	4.69×10^{-3} 3.39×10^{-3} 8.08×10^{-3}	7.90×10^{-2} 4.45×10^{-2} 1.24×10^{-1}	2.54×10^{-1} 5.56×10^{-2} 3.10×10^{-1}	5.42×10^{-1} 8.61×10^{-2} 6.28×10^{-1}	9.56×10^{-1} 1.29×10^{-1} 1.09
W_o/W_T		2.90×10^{-1}	2.68×10^{-1}	2.14×10^{-1}	2.06×10^{-1}	2.04×10^{-1}

決め制御で制振する必要があるため、動作時間とアクチュエータの仕事の両面で比較対象に比べ不利となる。それでも γ の値が高くなるのは、ブレーキ解放後の第2関節の角速度が動学的干渉のみで高くなるため、アクチュエータの仕事に対して E_p が大きくなるためである。このことから第2関節の動作角度が大きいほど、対象とするマニピュレータの構造はこのような動作設定において省力化に効果があるといえる。指示角速度に対する γ の変化は、2種類の比較対象とは異なる傾向を示している。これは、表2に示すように対象とするマニピュレータの制御時間が、駆動角速度によらないことと、そのときのアクチュエータの仕事も他の比較モデルや駆動時の仕事と比べ、変化が緩やかであることに起因している。これらの値は、制御開始時のリンクのひずみ速度によって大きく変化する傾向が認められたため、今後検討する必要がある。またこの傾向を利用できれば、制御開始時間のわずかな調整でさらに γ の値が高くなる可能性がある。さらに実際には一般的な構造に比べ、リンクや関節の軽量化を図ることが容易に予想できる。加えて図8, 9に示した M_p あるいは $\dot{\theta}_1$ と T_{MAX} との関係から M_p や $\dot{\theta}_1$ が大きいほど低剛性リンクの変位が大きくなり、駆動トルクの低減に効果的であることが示された。また表2に示されるように、ペイロードの運動エネルギーやリンクの弾性ひずみエネルギーの増加に対し、制御時のアクチュエータの仕事の変化が緩やかであることが認められた。 W_o/W_T について検討すると、対象とする構造でのアクチュエータの仕事は、一般的な構造の30%以下であり駆動角速度が大きいほどその比率は小さくなっている。以上のことから、このような動作設定では駆動角速度や把持重量によらず、省力化に適した構造であるといえる。このマニピュレータの問題としては、0.7s程度の制御時間が大きな問題となるような短時間の作業に対して、例えばリンクの曲げ剛

性を制御するような解決策の検討が必要となる。また、第2関節にアクチュエータをもたないため、位置決め時の姿勢に対してロバストな制御、あるいはその変化に適応可能な制御手法が必要となる。さらに、 $\theta_2(0)$ が $-\pi$ から $-\pi/2$ rad と $\pi/2$ から π rad の範囲内となる動作設定では、低剛性リンクの弾性振動による非駆動関節への作用がマニピュレータの運動に効果的でなくなる可能性がある。このため、今後このような設定を含めた作業計画の検討を行わなければならない。

一方、剛体リンクと非駆動関節の構成は、一般的なものと比較して γ が高い値を示した。このマニピュレータの場合、目標地点に到達するまでの時間は、3種類中最も長くなる。しかしながら、動学的干渉のみで第2リンクを駆動するうえ、位置決め時に制振する必要がないため、アクチュエータの仕事が小さくなる。このため、動作中に比較的短時間で非駆動関節のブレーキのON/OFF切り替えを複数回行うような場合、特に動作の省力化に有効な構造であると考えられる。

5. 結 言

非駆動関節と低剛性リンクの弾性振動によって生じる、動学的干渉を利用することを構造上の特徴としたマニピュレータの動特性シミュレーションを行い、以下のことを明らかにした。

(1) 対象とするマニピュレータのエネルギー効率指数ならびに搬送効率指数は、設定した動作パターンにおいて、非駆動関節の初期角度を $-\pi/2$ rad に設定し、ブレーキをかけた状態で駆動開始した場合に最大となることがわかった。

(2) 対象とするマニピュレータは、重量物を搬送するのに適した構造であることが示された。

(3) 動作1のパターンにおいて、 $\theta_2(0)$ の設定が

$-\pi/2$ rad であり, 第1関節と第2関節の角度が等しくなったところに目標地点が設定された場合, 一般的な構造のものに比べ作業効率指数が高く, 省力化に適した構造であると考えられる。

最後に, このマニピュレータはブレーキ機構を有しているため, 単純な搬送作業においても軌道計画が複雑になることが予想される。このため, これらの結果をもとに最大原理などを用いた最適軌道計画について検討する必要がある。

文 献

- (1) 荒井裕彦・館暲, 機論, 57-534, C (1991), 619-624.
- (2) 荒井裕彦・館暲, 機論, 57-537, C (1991), 1621-1624.
- (3) 柳基鎔・ほか2名, 機講論 (機械力学・計測制御), No. 940-26 (1994-7), 300-303.
- (4) 小島宏行・ほか3名, 機論, 57-539, C (1991), 2291-2296.
- (5) 鈴木聡一郎・ほか3名, 機論, 61-586, C (1995), 2508-2513.
- (6) 鈴木聡一郎・ほか2名, 機講論 (ロボティクス・メカトロニクス), No. 95-17 (1995-6), 1254-1257.