

フレキシブルマニピュレータの手先加速度操作性

金岡 克弥*¹ 吉川 恒夫*²

End-Effector Acceleration Manipulability of Flexible Manipulators

Katsuya Kanaoka*¹ and Tsuneo Yoshikawa*²

In this paper, we discuss end-effector acceleration manipulability of flexible manipulators. We propose a *non-stretch flexible beam* model which is better to express real flexible beams than Euler-Bernoulli or Timoshenko beam. Based on this model, we have shown that a flexible beam has only one direction to transfer acceleration from driving force/torque on its proximal end. This is an intermediate characteristic between rigid body and elastic body. We have also found that conventional flexible manipulators (with point joints) have no direct relation between proximal driving force/torque and distal acceleration. Then we have discussed a new construction with rigid flanges and found that the flexible manipulators with rigid flanges have a direct relation between proximal driving torque and distal acceleration in only one direction. We verified above numerical results by some experiments.

Key Words: Flexible Manipulator, Non-Stretch Flexible Beam, Virtual Joint Model, Rigid Flange, Dynamic Manipulability

1. はじめに

剛体マニピュレータの動的可操作性 [1] は、関節駆動力による手先加速度の操作性を表現する指標として広く用いられている。しかし、フレキシブルマニピュレータにおいては、アクチュエータと手先効果器の間に柔軟体が存在するために、関節駆動力が直接には手先効果器に伝わらない [2]。そのため、フレキシブルマニピュレータの操作性は剛体マニピュレータよりも低くなると容易に推測されるが、その詳細は明らかではなかった。そこで、フレキシブルマニピュレータの関節駆動力による手先加速度の操作性について検討することを本論文の目的とする。

フレキシブルジョイントマニピュレータでは、関節駆動力と手先加速度は直接の線形関係を持たないことが De Luca [3] によって示されている。これは、関節駆動力から手先加速度への線形変換行列のランクがゼロであることを意味し、駆動力を加えても、その瞬間の手先加速度には何の影響も及ぼさない。

同じく De Luca ら [4] は、関節ではなくリンクが柔軟なフレキシブルリンクマニピュレータについて、関節駆動力から手先加速度への線形変換行列は基本的にはフルランクであり、姿勢によっては特異となることを示唆している。

細田ら [5] は、バネ質量モデル [6] でモデル化した平面 2 自由

度フレキシブルリンクマニピュレータについて、逆ダイナミクスによる手先加速度制御が常に特異であり、関節駆動力から手先加速度への線形変換行列のランクは 1 であるとしている。

このように、手先加速度操作性について結果が異なるのは、それぞれが異なる動力学モデルで柔軟性を表現していることに起因する。本論文では、Euler-Bernoulli 梁や Timoshenko 梁に代わる柔軟梁の動力学モデルとして「非伸縮柔軟梁」を導入し、非伸縮柔軟梁モデルの構築手法、および動特性の解析手法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。2 章において、動的可操作性をフレキシブルマニピュレータに拡張して定義する。3 章では非伸縮柔軟梁を定義し、妥当性を示す。また、柔軟梁単体での手先加速度操作性についても検討する。4 章では、平面 2 自由度フレキシブルマニピュレータの手先加速度操作性について数値的に考察する。5 章では、4 章の数値計算結果を実機で確認する。6, 7 章で考察と結論を述べる。

2. フレキシブルマニピュレータの動的可操作性

本章では、手先加速度操作性を表現する指標として、動的可操作性の定義をフレキシブルマニピュレータに拡張する。

2.1 運動学

フレキシブルマニピュレータの運動学は、

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}, \phi) \quad (1)$$

となる。ただし、 $\mathbf{r} \in \mathcal{R}^m$ は手先効果器の位置姿勢を表す m 次元ベクトル、 $\boldsymbol{\theta} \in \mathcal{R}^n$ は関節変位ベクトルであり、自由度数 n

原稿受付 2002 年 6 月 5 日

*¹立命館大学理工学部ロボティクス学科*²京都大学大学院工学研究科*¹Department of Robotics, Ritsumeikan University*²Graduate School of Engineering, Kyoto University

は $n \geq m$ であるとする． $\phi \in \mathbb{R}^g$ は柔軟リンクの弾性変位を g 次元で有限次元近似した弾性変位ベクトルである． \mathbb{R}^n は n 次元ユークリッド空間を表す．

式 (1) を時間微分して，

$$\dot{r} = J_1 \dot{\theta} + J_2 \dot{\phi} \quad (2)$$

を得る． $J_1 = \partial r / \partial \theta \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ， $J_2 = \partial r / \partial \phi \in \mathbb{R}^{m \times g}$ はヤコビ行列である．式 (2) をさらに時間微分して，以下の式を得る．

$$\ddot{r} = J_1 \ddot{\theta} + J_2 \ddot{\phi} + \dot{J}_1 \dot{\theta} + \dot{J}_2 \dot{\phi} \quad (3)$$

2.2 動力学

フレキシブルマニピュレータの動力学は，

$$M_{11}(\theta, \phi) \ddot{\theta} + M_{12}(\theta, \phi) \ddot{\phi} + h_1(\theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi}) = \tau \quad (4)$$

$$M_{21}(\theta, \phi) \ddot{\theta} + M_{22}(\theta, \phi) \ddot{\phi} + h_2(\theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi}) = 0 \quad (5)$$

となる．ただし， $M_{11} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $M_{12} \in \mathbb{R}^{n \times g}$ ， $M_{21} \in \mathbb{R}^{g \times n}$ ， $M_{22} \in \mathbb{R}^{g \times g}$ は慣性行列， $h_1 \in \mathbb{R}^n$ ， $h_2 \in \mathbb{R}^g$ はその他の非線形項， $\tau \in \mathbb{R}^n$ は関節駆動力である．

2.3 関節駆動力と手先加速度の関係

式 (3) (4) (5) から，弾性変位加速度 $\ddot{\phi}$ を陽に含まない関節駆動力 τ と手先効果器の加速度 \ddot{r} との関係式は，

$$\ddot{r} = JM^{-1}(\tau - h) + a_r \quad (6)$$

となる．ただし，

$$J = J_1 - J_2 M_{22}^{-1} M_{21} \quad (7)$$

$$M = M_{11} - M_{12} M_{22}^{-1} M_{21} \quad (8)$$

$$h = h_1 - M_{12} M_{22}^{-1} h_2 \quad (9)$$

$$a_r = \dot{J}_1 \dot{\theta} + \dot{J}_2 \dot{\phi} - J_2 M_{22}^{-1} h_2 \quad (10)$$

2.4 動的可操作性楕円体

フレキシブルマニピュレータの動的可操作性楕円体 (Dynamic Manipulability Ellipsoid, DME) を定義する．まず，式 (6) の \ddot{r} ， τ を正規化する．

$$\hat{a} = [\ddot{r}_1 / \ddot{r}_{1max}, \ddot{r}_2 / \ddot{r}_{2max}, \dots, \ddot{r}_m / \ddot{r}_{mmax}]^T \quad (11)$$

$$\hat{\tau} = [\tau_1 / \tau_{1max}, \tau_2 / \tau_{2max}, \dots, \tau_n / \tau_{nmax}]^T \quad (12)$$

これらを用いて，式 (6) は，

$$\hat{a} = \hat{J} \hat{M}^{-1} \hat{\tau} - \hat{J} M^{-1} h + T_a a_r \quad (13)$$

となる．ただし，

$$\hat{J} = T_a J \quad (14)$$

$$T_a = \text{diag} [1/\ddot{r}_{1max}, 1/\ddot{r}_{2max}, \dots, 1/\ddot{r}_{mmax}] \quad (15)$$

$$\hat{M} = T_\tau M \quad (16)$$

$$T_\tau = \text{diag} [1/\tau_{1max}, 1/\tau_{2max}, \dots, 1/\tau_{nmax}] \quad (17)$$

フレキシブルマニピュレータの DME は， $\|\hat{\tau}\| \leq 1$ を満足するような正規化関節駆動力 $\hat{\tau}$ を用いて実現できる手先効果器の

加速度 \hat{a} のすべての集合であり，式 (13) より

$$a^T (\hat{J}^+)^T \hat{M}^T \hat{M} \hat{J}^+ a \leq 1 \quad \text{and} \quad a \in R(\hat{J}) \quad (18)$$

$$\text{where} \quad a = \hat{a} + \hat{J} M^{-1} h - T_a a_r \quad (19)$$

によって定まる m 次元ユークリッド空間内の楕円体として表現される．ただし， $R(J)$ は J の値域である．

$m = n$ として，式 (13) の $\hat{J} \hat{M}^{-1}$ の特異値分解を

$$\hat{J} \hat{M}^{-1} = U \Sigma V^T \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (20)$$

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \quad (21)$$

とすると，DME の各主軸長は，特異値 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ で与えられる．

3. 非伸縮柔軟梁

本章では，一般的な柔軟梁モデルの問題点を指摘し，それを解決する新たな柔軟梁モデルを定義する．

3.1 柔軟梁モデルの妥当性

分布定数系モデル [7] に一般的に用いられる Euler-Bernoulli 梁，Timoshenko 梁では，柔軟梁の弾性変形は Fig. 1 (a) のようにモデル化される．根元座標系 Σ_p において， x_p 方向の長さは弾性変形がない場合の梁長さ l で定義される．しかし，弾性変形が生じて x_p 方向の長さは l で変化しないため，実際の梁長さは $l' > l$ となる．すなわち，これらのモデルでは，柔軟梁が y_p 方向の弾性変形に依存して伸縮してしまうことになり，弾性変形がある程度大きくなると妥当性に問題が生じる．

3.2 非伸縮柔軟梁の定義

我々は「梁の長手方向には伸縮しない」ことが柔軟梁の本質であり，柔軟梁先端の挙動を詳しく解析するには，この特徴を理想化したモデルが必要であると考えた．まず，柔軟梁の長手方向に中立軸を仮定する．このとき，

(1) 梁に沿って中立軸方向には伸縮しない．

(2) 曲げ方向，ねじり方向に弾性変形する．

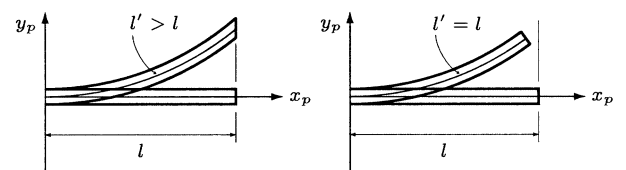
(3) 剪断変形はしない．

という性質を持つ柔軟梁を非伸縮柔軟梁と定義する．

非伸縮柔軟梁の変形は Fig. 1 (b) のようになり，柔軟梁先端の挙動をより正確に表現できる．

3.3 仮想関節モデルによる非伸縮柔軟梁の定式化

文献 [8] [9] では，前節で定義した非伸縮柔軟梁と同様のモデルが静的な変形解析のために用いられている．また，KdV 方程式 [10] を用いて，分布定数系の非伸縮柔軟梁モデルを構築することも可能であると考えられる．しかし，我々は，物理的な理解の容易さを重視して，集中定数系のモデルによって非伸縮柔



(a) Euler-Bernoulli beam (b) non-stretch flexible beam

Fig. 1 Comparison of the flexible beam models

Table 1 Natural frequency [Hz] of the Euler-Bernoulli beam (up to 5th mode)

1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode	5th mode
11.1186	69.6972	195.104	382.325	632.011

軟梁を定式化する．

集中定数系のモデルには、吉川ら [11] による仮想関節モデルを用いる．仮想関節モデルは非伸縮柔軟梁の定義を自然に表現できる動力学モデルであることは、後述する Fig. 2 から明らかである．さらに、仮想受動関節数を大きくすれば、十分な精度で非伸縮柔軟梁を定式化することが可能であると期待される．ここでは、仮想関節モデルによる非伸縮柔軟梁の特性と、分布定数系モデルとしての Euler-Bernoulli 梁の特性を数値計算によって比較し、非伸縮柔軟梁のモデル化における仮想関節数の効果を確認する．

まず、Euler-Bernoulli 梁を定義する．円断面の様な片持ち梁とし、梁長さ $l = 1.000$ [m]、直径 $d = 0.020$ [m]、質量 $m = 1.000$ [kg]、曲げ剛性 $EI = 10.0$ [N·m²] である．

次に、 n_{vj} 個の仮想受動関節を持つ仮想関節モデルを二次元平面上で Fig. 2 のように定める．仮想受動関節によって柔軟梁が等分割されるとして、各仮想剛体リンク長 l_i 、重心 l_{gi} 、質量 m_i 、重心まわりの慣性モーメント I_i ($i = 0, 1, \dots, n_{vj}$) は次のようになる．

$$l_i = l / (n_{vj} + 1) \quad (22)$$

$$l_{gi} = l_i / 2 \quad (23)$$

$$m_i = m / (n_{vj} + 1) \quad (24)$$

$$I_i = m_i (d^2 / 16 + l_i^2 / 12) \quad (25)$$

仮想関節の弾性係数は、以下のように同定する．先に定義した Euler-Bernoulli 梁の先端に曲げモーメント M_z を加えたとき、先端変位角が ϕ_M であったとすると、

$$\phi_M = M_z l / EI \quad (26)$$

である．同じ M_z を仮想関節モデルの梁先端に加えたときに、同じ ϕ_M となる仮想受動関節のバネ定数 k_i ($i = 1, 2, \dots, n_{vj}$) は、

$$k_i = M_z n_{vj} / \phi_M = EIn_{vj} / l \quad (27)$$

となる．減衰項については考慮しない．

Euler-Bernoulli 梁の固有振動数は、分布定数系における様な片持ち梁の振動数方程式 [12]

$$\cos \lambda \cosh \lambda + 1 = 0 \quad (28)$$

を解いて固有値 λ を求め、

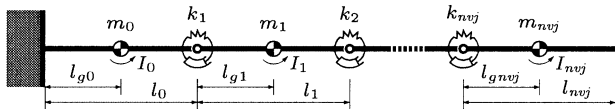


Fig. 2 Virtual joint model for non-stretch flexible beams

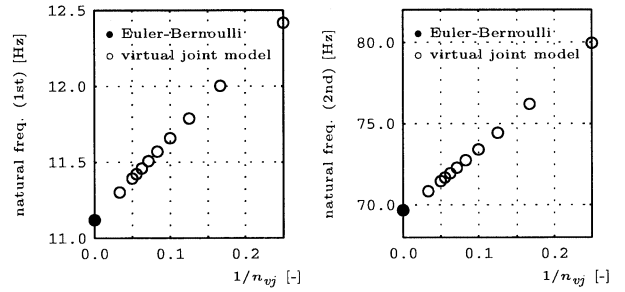


Fig. 3 Natural frequency of the virtual joint model

$$\omega = \frac{2\lambda^2}{l^2 d} \sqrt{\frac{EI}{\pi \rho}} \quad (29)$$

に各モードに対応する固有値を代入することによって Table 1 のように導出される．一方、仮想関節モデルの固有振動数は、仮想関節モデルの運動方程式の一般化固有値問題を解くことにより計算される．仮想受動関節数 $n_{vj} = 4, 6, \dots, 30$ について、微小弾性変位 $\phi \approx 0$ における固有振動数を計算し、 $1/n_{vj}$ に対する変化を各振動モード（一次、二次）ごとにプロットしたものを Fig. 3 に示す．Fig. 3 から、仮想関節数 n_{vj} の増加に応じて仮想関節モデルの固有振動数は Euler-Bernoulli 梁の固有振動数に近付いていき、 $n_{vj} \rightarrow \infty$ ($1/n_{vj} \rightarrow 0$) で Euler-Bernoulli 梁と一致すると推測される．より高次のモードについても Fig. 3 と同様の結果が得られた．

必ずしもこの結果が、仮想関節モデルによる非伸縮柔軟梁の定式化の妥当性を直接示すものではない．しかし、提案する集中定数系の非伸縮柔軟梁モデルにおいて、 $n_{vj} \rightarrow \infty$ とした極限での動特性を推測することで、分布定数系モデルとしての Euler-Bernoulli 梁と同等の動特性解析が可能であることを示唆する結果となっている．また、柔軟梁の弾性変形が無視できる場合、非伸縮柔軟梁と Euler-Bernoulli 梁は等価であることから、非伸縮柔軟梁の定式化の物理的な妥当性を示す一例となるものである．

3.4 非伸縮柔軟梁の特性

本節では、非伸縮柔軟梁単体での手先加速度操作性について検討する．簡単のため二次元平面上で考える．Fig. 4 に示すように、非伸縮柔軟梁の根元に並進 2 自由度、回転 1 自由度の駆動関節を取り付け、この駆動関節に駆動力（モーメント） ${}^p f_x, {}^p f_y, {}^p f_\alpha$ をそれぞれ加えた瞬間の、非伸縮柔軟梁の先端座標系 Σ_d 各軸方向の先端加速度成分 ${}^d \ddot{r}_x, {}^d \ddot{r}_y, {}^d \ddot{r}_\alpha$ を数値計算する．

仮想関節モデルのパラメータは前節と同じである．ただし、ここでは駆動力の効果のみが必要であるので、仮想受動関節の

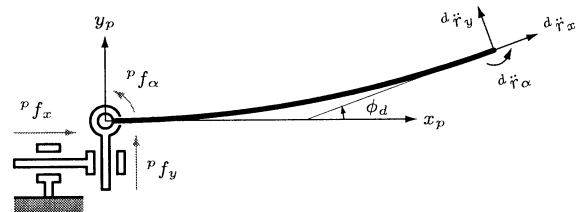


Fig. 4 Actuated cantilever of a non-stretch flexible beam

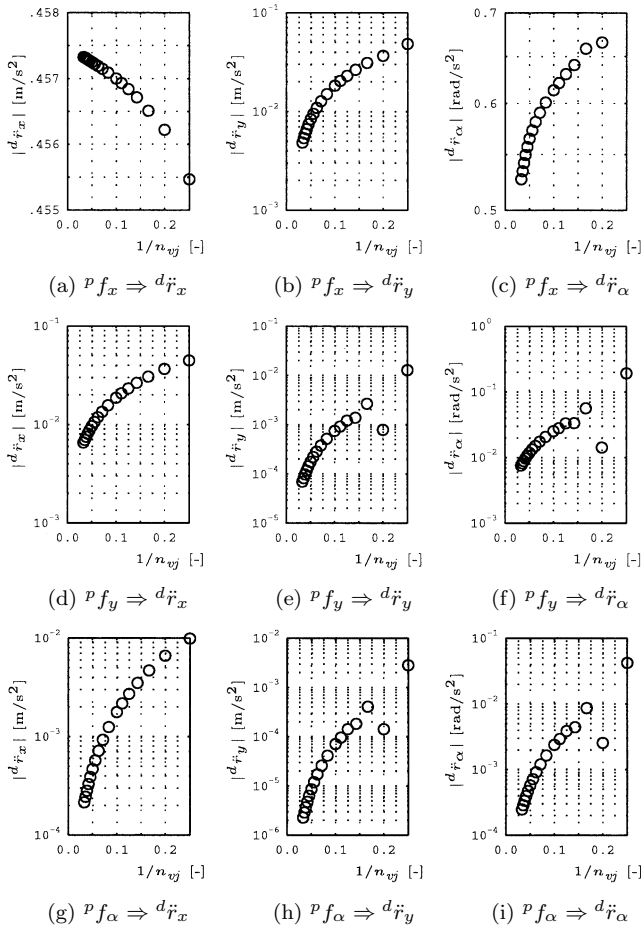


Fig. 5 Tip acceleration of the actuated cantilever

粘弾性は考えない．また，根元 3 自由度の駆動関節には，ローター慣性（出力軸換算）を根元からそれぞれ 1.0 [kg], 1.0 [kg], 1.0 [kg·m²] と定めた．各仮想受動関節の弾性変位 ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, n_{vj}$) は，柔軟梁の先端変位角度 $\phi_d = 30^\circ$ を n_{vj} で等分して与えた．

以上の設定で， $n_{vj} = 4, 6, \dots, 30$ について数値計算を行った結果を Fig. 5 に示す．Fig. 5 のすべてのグラフで，横軸は仮想受動関節数の逆数 $1/n_{vj}$ である．Fig. 5 (a) ~ (c) は $^p f_x = 1.0$ [N] のみを加えたときの手先加速度 $^d \ddot{r}_x$, $^d \ddot{r}_y$, $^d \ddot{r}_\alpha$ の絶対値の仮想受動関節数による変化をプロットしたものである．同様に (d) ~ (f) は $^p f_y = 1.0$ [N] の $^d \ddot{r}_x$, $^d \ddot{r}_y$, $^d \ddot{r}_\alpha$ ，(g) ~ (i) は $^p f_\alpha = 1.0$ [N·m] の $^d \ddot{r}_x$, $^d \ddot{r}_y$, $^d \ddot{r}_\alpha$ である．Fig. 5 から， $n_{vj} \rightarrow \infty$ ($1/n_{vj} \rightarrow 0$) で (a) のみが一定値に収束し，その他の加速度はすべて 0 に収束する傾向があることが分かる． $\phi_d = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の非伸縮柔軟梁についても同様の数値計算を行い，同じ傾向を確認した．

4. フレキシブルマニピュレータの動的可操作性についての数値的考察

本章で取り扱うフレキシブルマニピュレータは基準座標系に固定された二次元平面上のマニピュレータで，能動 2 自由度回転関節を持つ．その 2 本のリンクは非伸縮柔軟梁で表現され，

Table 2 Manipulator parameters

		joint or link 1	joint or link 2
link length	[m]	0.728	0.688
link diameter	[m]	0.013	0.008
link density	[kg/m ³]	7940.0	7940.0
tip payload mass	[kg]	4.3112	0.6352
tip payload inertia	[N·m/rad]	1.0914×10^{-2}	5.2955×10^{-4}
joint rotor inertia	[N·m/rad]	7.70	0.33
τ_{max}	[Nm]	80.0	15.0

関節に柔軟性は存在しないとする．本章では，このようなフレキシブルマニピュレータについて 2.4 節で定義した DME を描き，その特徴について考察する．

4.1 点関節フレキシブルマニピュレータ

ここでいう点関節フレキシブルマニピュレータとは，関節に剛体フランジと見なせる部分がなく，関節回転軸に直接柔軟リンクの根元がついている構造のマニピュレータである．Fig. 6 に，このマニピュレータの DME を仮想関節モデルに基づいて数値計算したものを示す．手先座標は可到達半径で正規化しており，仮想受動関節数は第一，第二リンク共 $n_{vj} = 10$ とした．各柔軟リンク先端の弾性変位はすべて -5° とし，それぞれ n_{vj} で等分して各仮想受動関節変位とした．図中，二重丸で表現されているのが能動関節，一重丸が仮想受動関節である．ここでは DME はほとんど点に近い線分となっていることに注意されたい．

このような，特定の仮想関節数で計算した DME のみに基づいてフレキシブルマニピュレータの動的可操作性について厳密に議論することは困難であるため， $n_{vj} \rightarrow \infty$ での長軸長 σ_1 ，短軸長 σ_2 の変化を観察することで，点関節フレキシブルマニピュレータの動的可操作性について検討する．

数値計算のパラメータを Table 2 に示す．これらは，次章で用いた実機と一致するパラメータである．各柔軟リンク上の仮想受動関節数をそれぞれ $n_{vj} = 1, 2, \dots, 10$ とし， σ_1, σ_2 の平均値を $x = 0.1$ から 0.9 で計算し， n_{vj} の逆数についてプロットしたものが Fig. 7 である．この図から， n_{vj} の増加に伴って σ_1, σ_2 は共にゼロに収束し， $n_{vj} \rightarrow \infty$ ($1/n_{vj} \rightarrow 0$) で $\text{rank } \hat{J} \hat{M}^{-1} \rightarrow 0$ と推測される．

すなわち，点関節フレキシブルマニピュレータの DME は常に点となり，関節駆動力を加えても，その瞬間の手先加速度には何の影響も及ぼさないことになる．

4.2 剛体フランジ付フレキシブルマニピュレータ

Fig. 6 と同じマニピュレータの柔軟リンク根元に，リンクと直角 (-90°) に剛体フランジを付加することを考える．関節 1 に付く剛体フランジの質量 0.943 [kg]，関節 2 に付く剛体フランジの質量 0.440 [kg]，フランジ長は共に 0.2 [m] である．これも，次章で用いた実機の剛体フランジの値である．このマニピュレータの DME を，第一，第二リンク共 $n_{vj} = 10$ ，各リンク先端弾性変位 -5° の仮想関節モデルで計算したものを Fig. 8 に示す．Fig. 6 と比較して楕円体のスケールが大きくなっていることに注意されたい．ここでも DME はやはり線分となる．

楕円体の変化について Fig. 9 に示す． n_{vj} の増加に伴って短軸長 σ_2 は減少するものの，長軸長 σ_1 はある値に収束する傾向を示す．このことから， $n_{vj} \rightarrow \infty$ で， $\text{rank } \hat{J} \hat{M}^{-1} \rightarrow 1$ と推測される．なお，剛体フランジのリンクへの取り付け角度を

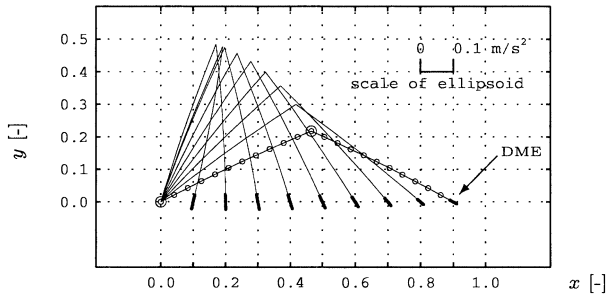


Fig. 6 DMEs of the point joint flexible manipulator

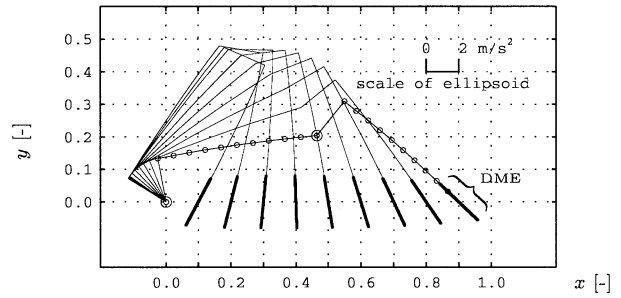


Fig. 8 DMEs of the flexible manipulator with rigid flanges

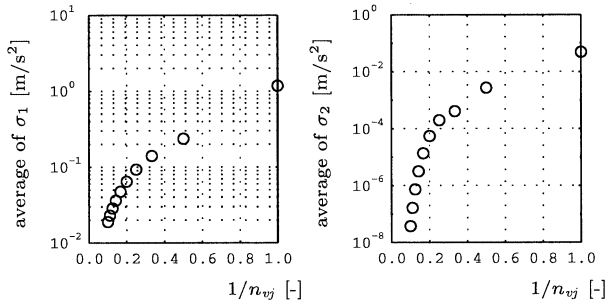


Fig. 7 Changes of singular values (point joints)

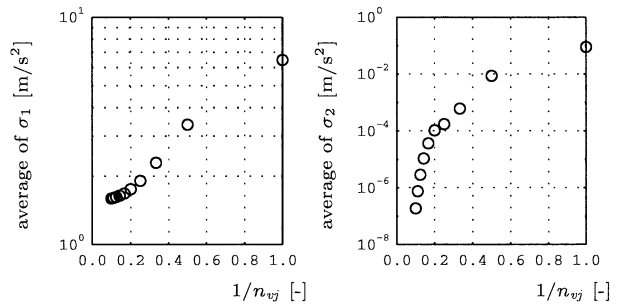


Fig. 9 Changes of singular values (with rigid flanges)

-45° に、各リンク先端弾性変位を 0°, -10° に変化させた場合も、同様の数値計算結果を得ている。

すなわち、柔軟リンク根元に剛体フランジを付加した場合、その DME は常に線分となる。これは、柔軟リンクを介しても駆動力と手先加速度には直接の関係があり、加速度制御が可能であることを意味する結果である。

5. 実験

本章では、前章で数値計算を行った平面 2 自由度点関節フレキシブルマニピュレータ、および剛体フランジ付フレキシブルマニピュレータについて、実機を用いてその手先加速度操作性を検討し、前章の数値解析結果と比較する。

実機の概観を Fig. 10 に示す。それぞれのマニピュレータ手先には 2 自由度の加速度センサが取り付けられており、手先座標系 Σ_d における加速度 ${}^d\ddot{r}_x, {}^d\ddot{r}_y$ を直接計測することができる。

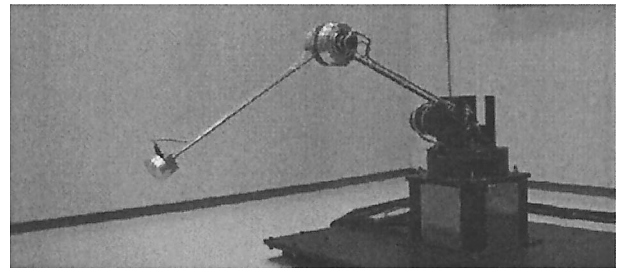
5.1 ステップ応答

まず、マニピュレータにステップ状の駆動力を加えたときの手先加速度の応答を測定する。

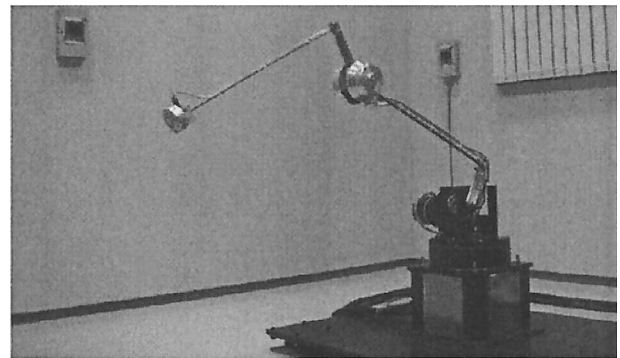
マニピュレータの関節角度を $\theta_1 = 29.9$ [deg], $\theta_2 = -49.7$ [deg] として、PD 制御によって静止状態を保つ。これは、点関節フレキシブルマニピュレータの手先位置 (マニピュレータ可到達半径で正規化) が $r_x = 0.9$ [-], $r_y = 0.0$ [-] となる関節角度である。時刻 $t = 0$ において各関節に $\tau_1 = 0, \tau_2 = \tau_{2max}$ のステップトルクを加える。このときの手先加速度応答を測定した結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 (a), (b) から、点関節フレキシブルマニピュレータの手先加速度はなだらかに増加していくことが分かる。これは、駆動力が手先に直接伝達されず、弾性変形を介して伝達していることを示す。

剛体フランジ付フレキシブルマニピュレータの場合、(d) は点関節と同様になだらかに増加するが、(c) では明らかに他よりも早く加速度応答が生じている。実験に用いた加速度センサで測定可能な周波数の上限がおよそ 200 [Hz] であり、ステップ入力直後の数 [ms] の応答は測定できないことを考慮すれば、Fig. 11 (c) は剛体フランジ付フレキシブルマニピュレータの手



(a) point joint flexible manipulator



(b) flexible manipulator with rigid flanges

Fig. 10 Experimental systems

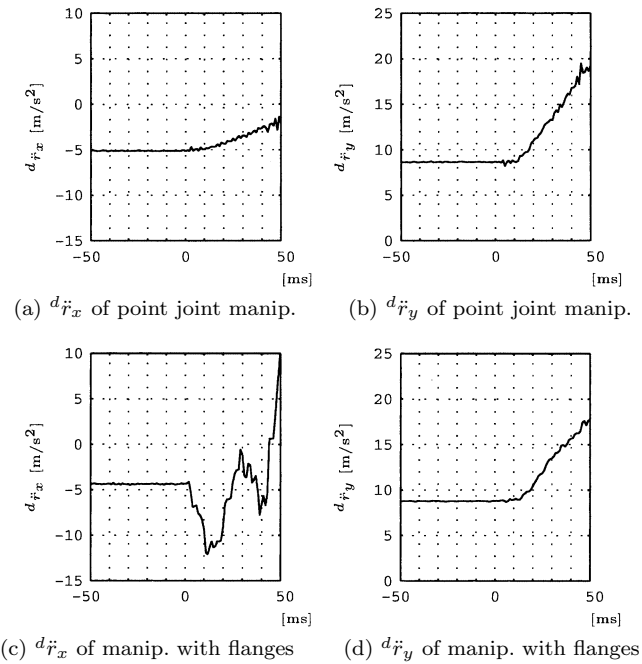


Fig. 11 Step response of tip acceleration

先方向加速度のみが、関節駆動力と直接の関係を持つと見なし
てよいことを示唆する結果となっている。

5.2 動的可操作性楕円体の描画

本節では、実機の DME を加速度のステップ応答に基づいて
描画し、前章の数値計算の結果と比較する。実験システムは、先
の実験と同じ構成である。

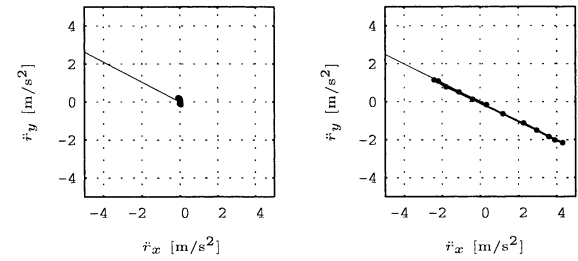
マニピュレータの関節角度を $\theta_1 = 29.9$, $\theta_2 = -49.7$ [deg]
として、PD 制御によって静止状態を保つ。 $t = 0$ において各関
節に $\|\hat{\tau}\| = 1$ のステップトルクを加え、このときの手先加速度
のステップ応答を前節と同様に測定する。手先加速度のステッ
プ応答の $t = 5$ から 7 [ms] の平均値を取り、この平均加速度を
用いて DME を描画すると Fig. 12 のようになる。 Fig. 12 に
おいては、手先位置を原点としてある。原点から左上方へ伸び
る細線は、手先におけるフレキシブルリンク角度である。

(a) の点関節マニピュレータでは、DME はほぼ点となるの
に対し、(b) の剛体フランジ付フレキシブルマニピュレータでは、
ほぼ手先方向と一致する線分となっている。これは、前章の数
値計算結果と一致するものである。

6. 考 察

まず、3 章での数値計算により非伸縮柔軟梁の手先加速度操
作性が明らかになった。定性的な表現をすれば、非伸縮柔軟梁
のビーム中立軸に沿った長さ方向に限り、根元に加えた駆動力
は加速度として直接伝達されるということであり、非伸縮柔軟
梁は剛体でも完全な弾性体でもない、両者の中間的な特徴を持
つことになる。

4, 5 章では、非伸縮柔軟梁をリンクに持つフレキシブルマ
ニピュレータの動的可操作性について数値的、実験的に考察した。
一般に解析、制御の対象になる点関節フレキシブルマニピュレ



(a) DME of point joint manip. (b) DME of manip. with flange

Fig. 12 DMEs of the real flexible manipulators

タでは手先加速度を駆動力によって直接発生することはできな
い。これは、非伸縮柔軟梁が回転関節に直接取り付けられてい
るために、ビーム根元に伝わる駆動力はモーメントのみで並進
力は発生せず、非伸縮柔軟梁根元にビーム長さ方向の並進力が
働かなければ、先端には加速度は発生しないということである。
一方、点関節フレキシブルマニピュレータに剛体フランジを付
加すると、一方向に限り手先加速度を駆動力によって直接発
生できるようになる。剛体フランジは能動関節における駆動トル
クを並進力として非伸縮柔軟梁根元に伝達するため、その並
進力のビーム根元における長さ方向成分が手先加速度を発生す
ると考えられる。

数値解析と実験結果から、非伸縮柔軟梁を介して駆動力によ
って直接発生する手先加速度方向は、手先座標系 x_d 方向である。
弾性変形を Fig. 1 (a) のようにモデル化する Euler-Bernoulli
梁などでは、駆動力によって直接発生する手先加速度方向は根
元座標系 x_p 方向であり、実験結果と相違することが分かっ
ている。この点からも、非伸縮柔軟梁の妥当性が示される。

7. お わ り に

本論文では、動的可操作性の概念をフレキシブルマニピュレ
ータに拡張して定義した。さらに、フレキシブルマニピュレ
ータの挙動をより正確に表現する非伸縮柔軟梁を定義し、仮想関節
モデルの仮想受動関節数を増加させていくことにより非伸縮柔
軟梁のモデル化を行った。非伸縮柔軟梁をリンクに持つフレキ
シブルマニピュレータの手先加速度操作性についても数値的、
実験的に検討し、一般の点関節フレキシブルマニピュレータと
剛体フランジ付フレキシブルマニピュレータの相違を明らかに
した。

以上、本論文で得た結果はフレキシブルマニピュレータの動
特性について有用な考察を与えるものである。今回示した剛体
フランジの効果はこれまでに指摘されていないものであり、今
後、様々な構造における剛体フランジのパラメータが手先加
速度操作性に及ぼす影響や、厳密に制御できる 1 自由度の手先加
速度 $d^2\hat{r}_x$ をいかに利用するかを含め、軌道制御、力制御等への
応用を考えていく予定である。

参 考 文 献

- [1] T. Yoshikawa: "Dynamic Manipulability of Robot Manipulators," Journal of Robotic Systems, vol.2, no.1, pp.113-124, 1985.
- [2] 原田, 吉川: "フレキシブルアームの動的軌道制御における内部安定

- 化”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.3, pp.444-453, 1996.
- [3] A. De Luca: “Dynamic Control of Robots with Joint Elasticity,” Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988.
- [4] A. De Luca, P. Lucibello and G. Ulivi: “Inversion Techniques for Trajectory Control of Flexible Robot Arms,” Journal of Robotic Systems, vol.6, no.4, pp.325-344, 1989.
- [5] 細田, 吉川: “平面 2 自由度フレキシブルアームの軌道制御”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.1066-1072, 1993.
- [6] T. Yoshikawa, H. Murakami and K. Hosoda: “Modeling and Control of a Three Degree of Freedom Manipulator with Two Flexible Links,” Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, vol.4, pp.2532-2537, 1990.
- [7] 嘉納: “フレキシブルアームの分布定数系モデル”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.5, pp.430-435, 1988.
- [8] H. Wakamatsu, S. Hirai and K. Iwata: “Modeling of Linear Objects Considering Bend, Twist, and Extensional Deformations,” Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.433-438, 1995.
- [9] 若松, 和田: “線状物体のモデリング”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.2, pp.145-148, 1998.
- [10] R.E. Goldstein and D.M. Petrich: “The Korteweg-de Vries Hierarchy as Dynamics of Closed Curves in the Plane,” Physical Review Letters, vol.67, no.23, pp.3203-3206, 1991.
- [11] T. Yoshikawa and K. Hosoda: “Modeling of Flexible Manipulators Using Virtual Rigid Links and Passive Joints,” The International Journal of Robotics Research, vol.15, no.3, pp.290-299, 1996.
- [12] 佐藤, 岡部, 岩田: 機械振動学. 工業調査会, 1993.



金岡克弥 (Katsuya Kanaoka)

1971 年 7 月 31 日生. 2002 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学. 同年立命館大学理工学部ロボティクス学科助手となり, 現在に至る. フレキシブルマニピュレータ, マスターズレーブシステムの研究に従事. 博士 (工学). 日本機械学会会員. (日本ロボット学会正会員)



吉川恒夫 (Tsuneo Yoshikawa)

1941 年 12 月 19 日生. 1969 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了. 同年同大学工学部助手. 1970 年同大学工学部助教授. 1986 年同大学工学部教授 (オートメーション研究施設. 1989 年より応用システム科学教室. 1991 年より機械工学教室). 1994 年同大学工学研究科教授 (機械工学専攻) となり, 現在に至る. ロボット工学, 制御工学, および力覚人工現実感の研究に従事. 工学博士. システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会の会員. 米国 IEEE 学会のフェロー. (日本ロボット学会正会員)