

インピーダンスマッチングに基づく ロボットの新たな評価指標の提案

九州大学 倉爪 亮 長谷川 勉

New index for a robot manipulator based on the concept of impedance matching

Kyushu University Ryo Kurazume Tsutomu Hasegawa

Abstract— In this paper, we propose a new index of manipulator's dynamic capability named Impedance Matching Ellipsoid, or IME, for serial link manipulators. Several indexes have been proposed in the past to illustrate statically and dynamically capability of a robot manipulator. For example, Dynamic Manipulability Ellipsoid (DME) describes a distribution of hand acceleration produced by normalized joint torque. Manipulating-Force Ellipsoid (MFE) denotes static force transmission from joints to a hand. On the other hand, the proposed IME illustrates dynamic torque-force transmission efficiency from actuators at joints to an object held at a hand. The concept of the IME involves a wide range of proposed indexes proposed as measures of manipulator's capability. The DME and MFE are both derived as a typical representation of the IME. This paper demonstrates the IME with numerical examples including optimal leg posture for a jump robot, and an extension to a free-flying manipulator.

Key Words: Impedance matching, torque-force transmission, Dynamic Manipulability Ellipsoid, Manipulating-Force Ellipsoid

1. はじめに

1980年代半ばから90年代初頭にかけて、マニピュレータの操作性を表す多くの指標が提案されている。例えば、マニピュレータの静力学的特性を示す指標として、ヤコビ行列の性質から関節速度と手先速度の関係を示した可操作性楕円体⁸⁾、静的なトルクと力との関係を表す操作力楕円体 (MFE)⁹⁾、特定の作業に対して最適な姿勢を決定するための compatibility index²⁾、ヤコビ行列の条件数⁴⁾などが示された。さらに同様にマニピュレータの動力学的な特性を表す指標として、トルクと手先加速度の関係を表す動的な可操作性楕円体 (DME)^{7), 5), 6)}、全作業空間での手先加速度上限の最小値として定義される acceleration radius³⁾などが提案され、さらにマニピュレータの分布質量を手先位置での仮想的な質量に置き換えることができる一般化慣性楕円体¹⁾も定式化されている。

さて、これらの指標はマニピュレータ単体、すなわち無負荷状態での操作性を示しているが、実際にはマニピュレータが対象物体を把持した状態で、どの程度の操作性が得られるかが問題となる場合も多い。特に組立工程でのピックアンドプレイス作業など、負荷質量がある程度限定できる場合には、その質量特性も含めた操作性の指標があると便利である。

ところで、これまでに単一のアクチュエータシステムに対し、ロータの慣性モーメントなどアクチュエータの慣性質量を考慮し、既定の軸負荷と出力トルクから最もトルク伝達効率の高いギア比を選択するための指標として、インピーダンスマッチング¹¹⁾の考えが広く使われている。

一方、シリアルリンクマニピュレータでは、ヤコビ行列が関節変位と手先位置変位の関係を表し、これはアクチュエータにおけるギア比に対応すると考えられる。そこでマニピュレータに対してもマニピュレータの

自重を考慮し、手先の負荷質量と各関節での出力トルクから最もトルク伝達効率の高い姿勢（関節角度）を選択するための指標として、インピーダンスマッチングの考えを導入することができる。

そこで本論文では、まず負荷質量が既知である場合に対するシリアルリンクマニピュレータのインピーダンスマッチング¹²⁾、およびインピーダンスマッチング楕円体 (IME) を定式化する。このように負荷質量が決定できれば、これまで静的なトルクと力、動的なトルクと加速度の関係を表す別個の指標として論じられてきた⁵⁾ 操作力楕円体 (MFE) と動的な可操作性楕円体 (DME) は、負荷質量を含めた運動方程式によって統一的に記述できる。すなわち操作力楕円体と動的な可操作性楕円体は、提案するインピーダンスマッチング楕円体の一実現状態として表される。また本論文では、提案するインピーダンスマッチング楕円体の有効な利用法の例として、跳躍ロボットの脚姿勢計画法、及び自重の影響がより大きく現れる宇宙用マニピュレータへの拡張例を示す。

2. シリアルリンクマニピュレータのインピーダンスマッチング

2.1 インピーダンスマッチングの考え方

まず単一のアクチュエータに対するインピーダンスマッチングの考え方を示す。図1に示すように、ロータや軸などアクチュエータの慣性モーメントを I_m 、負荷の慣性モーメントを I_l 、ギア比を ξ 、負荷の回転角速度を ω_l とすると、アクチュエータで発生する軸換算トルク τ_m は、

$$\tau_m = \left(I_m + \frac{I_l}{\xi^2} \right) \xi \omega_l^2 \quad (1)$$

であり，負荷が受けるトルク τ_l は

$$\tau_l = I_l \omega_l \quad (2)$$

である．従って，トルクの伝達効率

$$\eta = \frac{\tau_m}{\tau_l} = \frac{\left(I_m + \frac{I_l}{\xi^2}\right) \xi \omega_l^2}{I_l \omega_l} \quad (3)$$

となり，これを最大にする最適なギア比は，

$$\xi = \sqrt{\frac{I_l}{I_m}} \quad (4)$$

で与えられる．このギア比を選択することで，同じ出力トルクでも負荷により大きな加速度を与えることができ，この関係をアクチュエータのインピーダンスマッチングと呼ぶ．

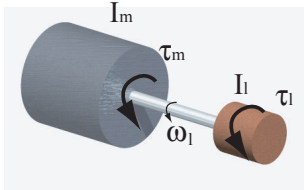


Fig.1 Impedance matching of an actuator

2.2 シリアルリンクマニピュレータのインピーダンスマッチング

本章では，各関節で発生したトルクを，効率よく手先に把持した負荷質量に伝達するための指標として，シリアルリンクマニピュレータのインピーダンスマッチングを提案し，視覚的に表す指標としてインピーダンスマッチング楕円体を定義する．

N 個のジョイントからなるシリアルリンクマニピュレータの運動方程式は次式で与えられる．

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + J(q)^T F_e \quad (5)$$

ここで $M(q) \in R^{N \times N}$ はマニピュレータの慣性行列， $C(q, \dot{q}) \in R^N$ はコリオリ力などの速度二乗項， $G(q) \in R^N$ は重力項， $J(q) \in R^{M \times N}$ はヤコビ行列， $F_e \in R^M$ は手先に加わる外力である．一方，手先の物体の運動方程式は，

$$F_e = M_p \ddot{x} + M_p g \quad (6)$$

である．ここで $\ddot{x} \in R^M$ は手先加速度， $M_p \in R^{M \times M}$ は物体の質量， $g \in R^M$ は重力加速度である．また手先加速度は

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (7)$$

であるから，これら Eqs.(5),(6),Eqs.(7) を整理すると次式を得る．

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)J(q)^\dagger M_P^{-1}(F_e - M_p g - M_p \dot{J}(q)\dot{q}) \\ &\quad + C(q, \dot{q}) + G(q) + J(q)^T F_e \\ &= Q(q)(F_e - F_{bias}) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし，

$$\begin{aligned} F_{bias} &= (J(q)^T + M(q)J(q)^\dagger M_P^{-1})^{-1} \\ &\quad ((M(q)J(q)^\dagger)(g + \dot{J}(q)\dot{q}) - C(q, \dot{q}) - G(q)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$Q(q) = (J(q)^T + M(q)J(q)^\dagger M_P^{-1}) \quad (10)$$

である．また $J(q)^\dagger \in R^{M \times N}$ はヤコビ行列 $J(q)$ の擬似逆行列であり，ヤコビ行列が正則でない場合には

$$J(q)^\dagger = M^{-1}J^T(JM^{-1}J^T)^{-1} \quad (11)$$

などを用いることにする．

さて Eq.(8) はアクチュエータで発生したトルクと，負荷が受け取った力の関係を表しており，係数 $Q(q) \in R^{N \times M}$ はトルクと力の伝達効率を表す行列である．そこでこの行列 $Q(q)$ を特異値分解する．

$$Q(q) = U\Sigma V^T \quad (12)$$

ただし， $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M) \in R^{M \times N}$ であり， $U \in R^{M \times M}$, $V \in R^{N \times N}$ は直交行列である．そこで $Q(q)$ の大きさ，すなわち各関節で発生したトルクから，負荷に実際に加えられた力への伝達効率を

$$w = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \dots \cdot \sigma_M \quad (13)$$

と定義し，本論文ではこれをマニピュレータのインピーダンスマッチング度を表す指標として定義する．なお，Eq.(13) で与えられる指標は，可操作度と可操作性楕円体との関係⁹⁾と同様に，以下に示すインピーダンスマッチング楕円体の超体積に比例する量であり，ある手先位置におけるすべての方向に対するトルク・力の伝達効率を総合的に評価する指標である．通常，マニピュレータにある作業を行わせる場合には，手先の運動方向は作業に応じてあらかじめ指定されているので，Eq.(13) で与えられる指標よりも，第3章の計算例のようにインピーダンスマッチング楕円体の運動方向への長さとして評価したほうが実用性が高い．

2.3 インピーダンスマッチング楕円体

各アクチュエータのトルク制限値が対称，すなわち

$$-\tau_i^{limit} \leq \tau_i \leq \tau_i^{limit} \quad (14)$$

であると仮定し，変換行列 L ，及び正規化トルク $\tilde{\tau}$ を

$$L = \text{diag}(\tau_1^{limit}, \tau_2^{limit}, \dots, \tau_n^{limit}) \quad (15)$$

$$\tilde{\tau} = L^{-1}\tau \quad (16)$$

とすると，大きさ1の正規化トルクを与えたときに物体に加わる力は

$$\tilde{\tau}^T \tilde{\tau} \leq 1 \quad (17)$$

より

$$(F_e - F_{bias})^T Q^T L^{-2} Q (F_e - F_{bias}) \leq 1 \quad (18)$$

となる．これは手先力空間での楕円体を表し，本論文ではこれを「インピーダンスマッチング楕円体」(Impedance matching ellipsoid, IME) と定義する．

2.4 動的可操作性, 操作力楕円体との関係

Eq.(18) で定義された楕円体は, $M_p \rightarrow 0$ とすると動的可操作性楕円体 (DME) と一致し, $M_p \rightarrow \infty$ とすると操作力楕円体と一致することを示す.

まず $M_p \rightarrow 0$ とすると, Eq.(8) は $F_e = 0$ より

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)J(q)^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) + C(q, \dot{q}) + G(q) \\ &= M(q)J(q)^{-1}(\ddot{x} - \ddot{x}_{bias}) \end{aligned} \quad (19)$$

となり, Eq.(18) は,

$$(\ddot{x} - \ddot{x}_{bias})^T (M(q)J(q)^{-1})^T L^{-2} (M(q)J(q)^{-1})(\ddot{x} - \ddot{x}_{bias}) \leq 1 \quad (20)$$

となる. これは動的可操作性楕円体 (DME) である.

一方, $M_p \rightarrow \infty$ とすると $\ddot{x} = 0$ であり, 静止状態を考え, かつ重力の影響を無視すると, Eq.(18) は,

$$F_e^T J(q)L^{-2}J(q)^T F_e \leq 1 \quad (21)$$

となり, これは操作力楕円体である.

これらのことから, インピーダンスマッチング楕円体は, 動的可操作性と操作力楕円体の中間的な性質を有し, それぞれはインピーダンスマッチング楕円体の手先の負荷質量の極限值として与えられる. 動的可操作性楕円体と操作力楕円体の統合は Koeppel ら⁵⁾ によっても試みられているが, これはそれぞれ独立して得られた評価を作業空間で統合する手法であり, 適当な手先負荷を設定することで両者を同時に定義できるインピーダンスマッチング楕円体は全く新しい概念である.

3. 計算例

3.1 跳躍ロボットの脚設計法

Fig.2 に示すような 2 自由度脚リンク系からなる跳躍ロボットに対して, 提案したインピーダンスマッチングを適用し, 最もトルク・力の伝達効率の高い最適な各脚の初期姿勢を示す.

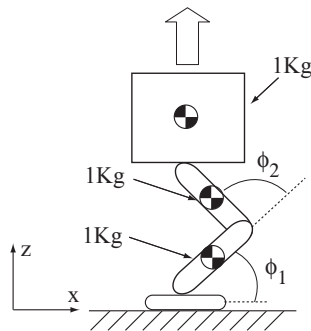


Fig.2 Impedance matching for a jumping robot

まず, 各リンクの質量, 長さを全て 1[Kg], 1[m] とし, 胴体の質量を 1[Kg], 各関節の角度を $\phi_1 = 45^\circ, \phi_2 = 90^\circ$ としたときのインピーダンスマッチング楕円体 (IME), 動的可操作性楕円体 (DME), 操作力楕円体 (MFE) を Fig.3 に示す. ただし, トルクの最大値 τ^{limit} は 10[Nm] とし, インピーダンスマッチング楕円体と操作力楕円体の単位は [N], 動的可操作性楕円体は $[m^2/s]$ である. このように, インピーダンスマッチング楕円体はマニピュレータ自身を駆動するのに必要なトルク

も考慮していることから, 操作力楕円体よりも常に小さな楕円になる. またトルク・力の伝達効率の最も高い運動方向は, 動的可操作性楕円体と操作力楕円体の長軸方向の中間となり, インピーダンスマッチング楕円体が両者の中間的な性質を有することがわかる.

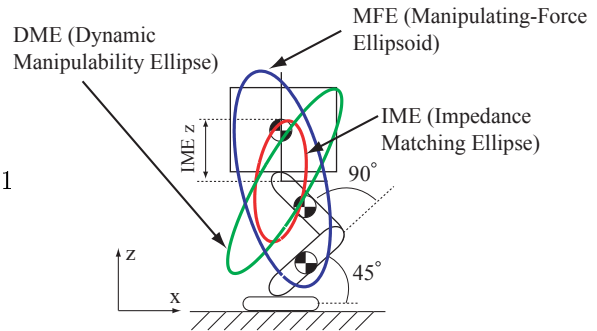


Fig.3 Impedance matching ellipsoid, IME

次に初期関節角度を変えて, z 軸方向に発生できる力を比較した. ただし足裏は常に胴体中心の真下にあるとし, $\phi_2 = \pi - 2\phi_1$ とした. 計算結果を Fig.4 に, 同様の条件で動的可操作性を計算した結果を Fig.5 にそれぞれ示す. これより, 提案したインピーダンスマッチング楕円体を用いると, $\phi_1 = 0.95[\text{rad}]$ で伝達効率のピークが存在するが, 動的可操作性では胴体の質量を考慮していないため, 単調減少となっていることがわかる. インピーダンスマッチングのピーク, すなわち力の伝達効率が高い姿勢では, 同じ関節トルクでより多くの力を胴体に与えることができる. また跳躍高さは, これを時間積分して得られる跳躍エネルギーにより決定されることから, 提案したインピーダンスマッチングは, 跳躍ロボットの脚リンク系の性能をより正確に表すことができる. また脚の姿勢を 4 通りに変えてインピーダンスマッチング楕円体と動的可操作性楕円体を求めた結果を Figs.6,7 に示す. 脚を伸ばすのに従い, 動的可操作性楕円体の鉛直方向成分は単調に減少するのに対し, インピーダンスマッチング楕円体は一旦増加し, あるピークを境に減少している.

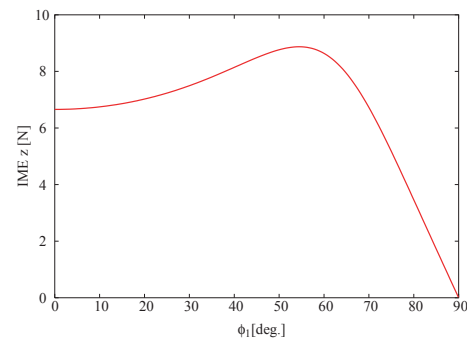


Fig.4 Vertical force derived from IME

2 つのリンクと本体からなる跳躍ロボットを考え, 動力学シミュレータ OpenHRP を用いて跳躍シミュレーション実験を行った. 跳躍ロボットの各リンクの質量, 長さは Fig.2 で示したモデルと同一である. 実験では動作開始後 0.1 秒間に関節 2 に 300[N] のトルクを与え,

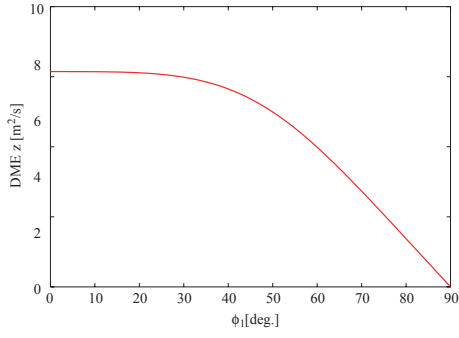


Fig.5 Vertical acceleration derived from DME

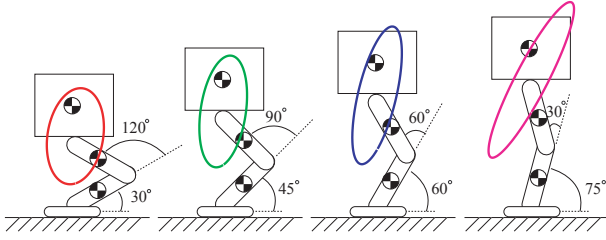


Fig.6 IME for various leg postures

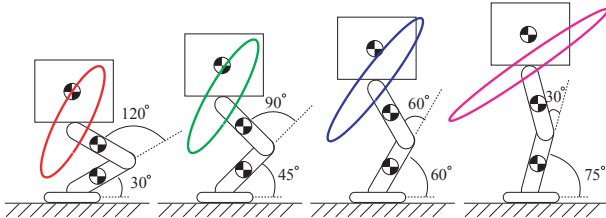


Fig.7 DME for various leg postures

その後は関節2を固定した $\phi_1 = 50^\circ$ とした時の実験結果の一例をFig.8に示す. また跳躍開始後の胴体高さの最高値と, 脚が離れた時点での胴体高さの差である最高跳躍高さをFig.9に示す. このように最高跳躍高さはある ϕ_1 でピークを持ち, ϕ_1 が増加すると急激に減少するなど, インピーダンスマッチング楕円体を用いて予想された鉛直方向への力の伝達効率 (Fig.4) と同じ傾向を有することがわかり, これによりインピーダンスマッチング楕円体の妥当性, 有用性を検証することができた.

3.2 宇宙用マニピュレータへの拡張

衛星に取り付けられたマニピュレータを動かすと, 宇宙空間には土台を固定するための足場が存在しないため, その半作用力により衛星本体にも運動が生じる¹⁰⁾. すなわち地上固定のマニピュレータに比べて, マニピュレータ自身の重量がマニピュレータの操作性に大きく影響する. そこで本項では, 提案したインピーダンスマッチングの宇宙用マニピュレータへの拡張例を示す.

まず i 個のリンクからなるフリーフライングロボットを考え, それぞれの質量, 慣性モーメントを m_i, I_i とする. このとき, ロボット重心周りの運動量, 角運動量は

$$\begin{pmatrix} P_g \\ L_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} wI_3 & 0 \\ 0 & I_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_g \\ \omega_g \end{pmatrix} \quad (22)$$

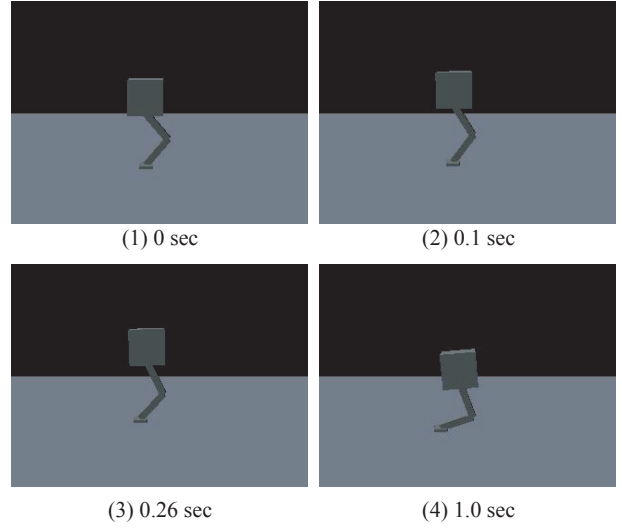


Fig.8 An example of jumping simulation

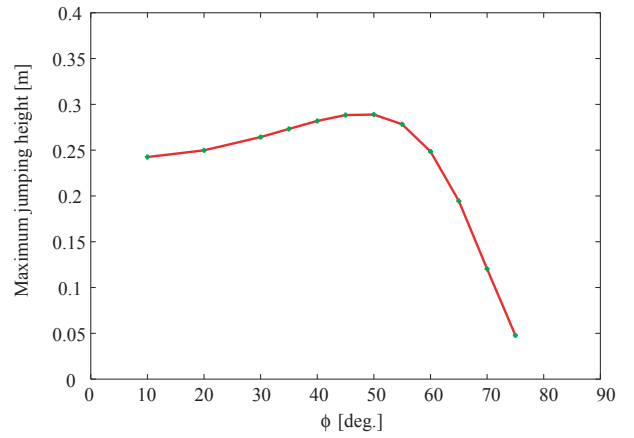


Fig.9 Maximum jumping height for various leg postures

で表される. ただし, $w = \sum m_i, I_g = \sum I_i + m_i \tilde{r}_{gi} \tilde{r}_{gi}$ であり, r_{gi} は全重心からリンク i 重心へのベクトル, \tilde{r} は歪対称行列である. 式(22)を微分し, 次式を得る.

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_g \\ \dot{L}_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} wI_3 & 0 \\ 0 & I_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_g \\ \dot{\omega}_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_g \times I_g \omega_g \end{pmatrix} \quad (23)$$

また, 重心周りの力と手先に加えられた力には,

$$\begin{pmatrix} f_g \\ n_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_3 & 0 \\ \tilde{r}_{gh} & I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_h \\ n_h \end{pmatrix} \quad (24)$$

の関係がある. また $f_g = \dot{P}_g, n_g = \dot{L}_g$ である.

よって, 式(23),(24)より,

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} wI_3 & 0 \\ 0 & I_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_g \\ \dot{\omega}_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_g \times I_g \omega_g \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} I_3 & 0 \\ \tilde{r}_{gh} & I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_h \\ n_h \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

が得られ, これを簡単に,

$$M\dot{V}_g + C = -R_h^T F_h \quad (26)$$

と表す. ただし $F_h = -(f_h, n_h)^T$ は手先から外へ加えられる力とモーメントである.

一方，フリーフライングロボットの一般化ヤコビ行列¹⁰⁾を J^* とすると，手先速度と重心速度，関節角速度の間に次式が成り立つ．

$$\dot{V}_h = J^* \dot{\phi} + R_h \dot{V}_g \quad (27)$$

式(26)を F_h について解き，式(27)を微分して代入すると，

$$F_h = -R_h^{-T} M R_h^{-1} \dot{V}_h + R_h^{-T} M R_h^{-1} J \ddot{\phi} \quad (28)$$

が得られる．ただし簡単のため静止状態を仮定し，速度二乗項は無視した．ここで，ハンド先端にある質量のペイロードが取り付けられた場合を考え，その慣性テンソルを W とする．このとき，このペイロードに加えらる力は，

$$F_h = W \dot{V}_h \quad (29)$$

である．式(28),(29)から，このときの手先加速度が

$$\begin{aligned} \dot{V}_h &= (R_h^{-T} M R_h^{-1} + W)^{-1} R_h^{-T} M R_h^{-1} J^* \ddot{\phi} \\ &= S J^* \ddot{\phi} \end{aligned} \quad (30)$$

と求められ，これよりペイロードに加えられた力は，

$$F_h = W S J^* \ddot{\phi} \quad (31)$$

となる．ただし， $S = (R_h^{-T} M R_h^{-1} + W)^{-1} R_h^{-T} M R_h^{-1}$ である．

ところで，フリーフライングロボットの運動方程式は

$$\tau = H^* \ddot{\phi} + C + J^{*T} F_h \quad (32)$$

で与えられる． H^* はフリーフライングロボットの関節空間に対する慣性テンソルである．これに式(31)を代入すると次式を得る．

$$\tau = (J^{*T} + H^* J^{*-1} S^{-1} W^{-1}) F_h \quad (33)$$

これは，慣性テンソル W のペイロードを式(30)の加速度で運搬するのに必要な，関節で発生すべきトルクを示しており，Eq.(8)で与えられるシリアルリンクマニピュレータのインピーダンスマッチングをフリーフライングロボットに拡張したものである．

さて，Eq.(8)とEq.(33)を比較すると，

$$J \rightarrow J^* \quad (34)$$

$$M_P \rightarrow W S \quad (35)$$

であり， S は関節角度の関数であるから，フリーフライングロボットでは，手先負荷質量 W を見かけ上， $W S$ へと変化させることが可能である．これを用いると，例えばフリーフライングロボットにより宇宙空間を漂う質量 W の故障衛星を捕まえる作業を考えた場合，マニピュレータの姿勢を適切に制御して $W S$ を小さくすることができれば，作業に必要なトルクを抑えることができ，エネルギー効率の向上が期待される．さらに，フリーフライングロボットにより軌道上に衛星を放出する作業でも，同様の考えから少ないトルクで大きな加速度を与えることができる．

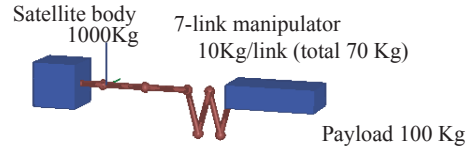


Fig.10 7-link manipulator on free flying satellite

Fig.10に示す衛星に搭載された7自由度マニピュレータを用いて，100Kgの小型衛星を放出するシミュレーション実験を行った．ただし衛星本体は一辺2mの立方体で重量1000Kg，各リンクは長さ1m，重量10Kgとした．

シミュレーションでは7自由度マニピュレータに対し，Fig.11に示す2つの初期状態を考え，x軸方向に加速して小型衛星を放出する作業を想定した．ただし初期姿勢Aは衛星本体側のリンクをたたんだ状態であり，初期姿勢Bは放出する衛星側のリンクをたたんだ状態である．

それぞれ初期姿勢に対してインピーダンスマッチング楕円体を計算した結果をFig.12に示す．これから，初期姿勢Aが各関節から放出衛星へのトルク・力伝達効率が高いことが予想される．

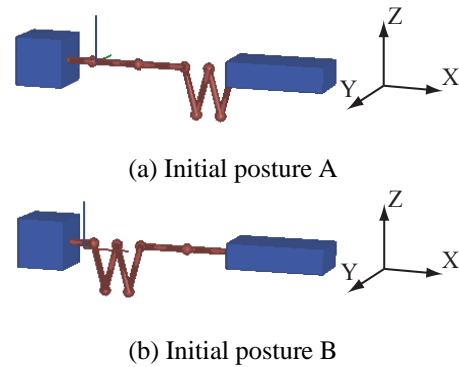


Fig.11 Two initial postures

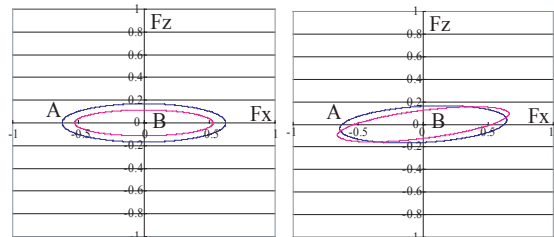


Fig.12 Impedance matching ellipsoid

そこで小型衛星の重量を変化させて，x軸方向に $0.1m/s^2$ の加速度で小型衛星を加速する場合のトルク・力伝達効率を計算した．初期状態での関節トルクの総和と小型衛星に加えられた力の総和の比をFig.13に示す．これより，小型衛星の質量が変化しても，初期姿勢Aの方がインピーダンスマッチングが良く，各関節から放出衛星へのトルク・力伝達効率が高いことがわかる．

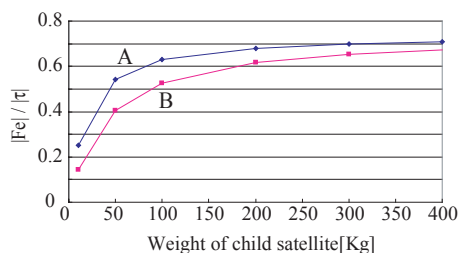


Fig.13 Efficiency of Torque-To-Force conversion

4. まとめ

本論文で我々はシリアルリンクマニピュレータの動的操作性能に対する新たな指標として、インピーダンスマッチングの概念、およびインピーダンスマッチング楕円体 (IME) を提案した。インピーダンスマッチングは従来単一のアクチュエータに対し、最もトルク伝達効率の高いギア比を選択するための指標として用いられてきた指標である。本論文ではこれをシリアルリンクマニピュレータに適用し、手先負荷とマニピュレータ自重が手先でのトルク・力の伝達効率に与える影響を示す指標として新たに定義した。また伝達効率をより視覚的、直感的に表現するために、インピーダンスマッチング楕円体を提案した。さらに本論文ではインピーダンスマッチング楕円体の有効な利用法の例として、跳躍ロボットの脚姿勢計画法、自重の影響がより大きく現れる宇宙用マニピュレータへの拡張例を示し、コンピュータシミュレーションによりこれらの概念の妥当性、有用性を検証した。

謝辞

本研究は、21世紀COEプログラム「システム情報科学での社会基盤システム形成」の一環として実施された。

参考文献

- 1) Haruhiko Asada. A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 105, No. 3, pp. 131–135, 1983.
- 2) Stephen L. Chiu. Task compatibility of manipulator postures. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 5, pp. 13–21, 1988.
- 3) Timothy J. Graettinger and Bruce H. Krogh. The acceleration radius: a global performance measure for robotic manipulators. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '88*, Vol. 2, pp. 965–971, 1988.
- 4) Charles A. Klein and Bruce E. Blaho. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 72–83, 1987.
- 5) Ralf Koeppel and Tsuneo Yoshikawa. Dynamic manipulability analysis of compliant motion. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '97*, 1997.
- 6) Michael T. Rosenstein and Roderic A. Grupen. Velocity-dependent dynamic manipulability. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002.
- 7) Tsuneo Yoshikawa. Dynamic manipulability of robot manipulators. *Journal of Robotics Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 113–124, 1985.

- 8) Tsuneo Yoshikawa. Manipulability of robot mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 3–9, 1985.
- 9) 吉川. ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- 10) 吉田, 倉爪, 梅谷. 宇宙ロボットの多腕協調制御 (スタビライジングアームの利用による制御トルクの最適化). *日本ロボット学会誌*, Vol. 9, No. 6, pp. 718–726, 1991.
- 11) 広瀬. ロボット工学. 裳華房, 1987.
- 12) 倉爪, 長谷川. フリーフライングロボットのインピーダンスマッチング. 第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 3J16, 2002.