

マニピュレータのインピーダンスマッチング特性に関する 実験的検討

倉爪 亮(九大) 村上 剛司(九大) 長谷川 勉(九大)

Experimental Study on Impedance Matching for Serial Link Manipulators

*Ryo Kurazume (Kyushu Univ.), Kouji Murakami (Kyushu Univ.),
and Tsutomu Hasegawa (Kyushu Univ.)

Abstract— We have proposed a new index of dynamic capability of a serial link manipulator named Impedance Matching Ellipsoid, or IME. The IME indicates dynamic torque-force transmission ratio from actuators at joints to an object at a hand. This paper introduces experimental results for evaluating the IME of the widely-used serial link manipulator, PA-10.

Key Words: Manipulability, Impedance Matching, Dynamic Manipulability Ellipsoid, Manipulating-Force Ellipsoid

1. はじめに

我々はこれまで、シリアルリンクマニピュレータの動的操作性に関する新たな指標として、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 [1]、およびインピーダンスマッチング楕円体 (IME) [2] を提案している。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。我々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、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 (IME) を提案した。

本報告では、代表的な汎用シリアルリンクマニピュレータである PA-10(三菱重工製) を用い、手先に付加質量を把持した状態で、各関節で発生したトルクと付加質量へ伝達された力を測定し、様々な姿勢におけるインピーダンスマッチング度を評価したので報告する。

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楕円体

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。

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + J(q)^T F_e \quad (1)$$

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、

$$\begin{aligned} F_e &= M_p \ddot{x} + M_p \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= M_p \ddot{x} + M_p g \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (3)$$

であるから、 M_p は常に正則であることを考慮し、これら式 (1),(2),(3) を整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)J(q)^\dagger M_p^{-1} (F_e - M_p g - M_p \dot{J}(q)\dot{q}) \\ &\quad + C(q, \dot{q}) + G(q) + J(q)^T F_e \\ &= Q(q)(F_e - F_{bias}) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} F_{bias} &= (J(q)^T + M(q)J(q)^\dagger M_p^{-1})^\dagger \\ &\quad [M(q)J(q)^\dagger (g + \dot{J}(q)\dot{q}) - C(q, \dot{q}) - G(q)] \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q(q) = J(q)^T + M(q)J(q)^\dagger M_p^{-1} \quad (6)$$

であり、 F_{bias} は速度や重力の影響を表すバイアス項である。また $J(q)^\dagger \in R^{M \times N}$ はヤコビ行列 $J(q)$ の擬似逆行列である。

さて式 (4) 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、モーメントの関係を表しており、係数 $Q(q) \in R^{N \times M}$ は関節トルクから力、モーメントへの伝達係数行列である。そこで関節全体で発生したトルクから、負荷に実際に加えられた力、モーメントへの伝達係数の総量を、行列 $Q(q)$ を特異値分解して得られる特異値の積

$$w = \sigma_1^{-1} \cdot \sigma_2^{-1} \cdots \sigma_M^{-1} \quad (7)$$

として表し、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する。

さらに各アクチュエータのトルク制限値が対称、すなわち

$$-\tau_i^{limit} \leq \tau_i \leq \tau_i^{limit} \quad (8)$$

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

$$L = \text{diag}(\tau_1^{\text{limit}}, \tau_2^{\text{limit}}, \dots, \tau_n^{\text{limit}}) \quad (9)$$

$$\tilde{\tau} = L^{-1}\tau \quad (10)$$

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

$$\tilde{\tau}^T \tilde{\tau} \leq 1 \quad (11)$$

より

$$(F_e - F_{bias})^T Q^T L^{-2} Q (F_e - F_{bias}) \leq 1 \quad (12)$$

となる．これは手先力空間での楕円体を表し，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．

2.2 動的可操作性，操作力楕円体との関係

式(12)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．

まず $M_p \rightarrow 0$ である場合，式(4)は $F_e = 0$ より

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)J(q)^\dagger(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) + C(q, \dot{q}) + G(q) \\ &= M(q)J(q)^\dagger(\ddot{x} - \ddot{x}_{bias}) \end{aligned} \quad (13)$$

となり，式(12)は，

$$(\ddot{x} - \ddot{x}_{bias})^T (M(q)J(q)^\dagger)^T L^{-2} (M(q)J(q)^\dagger) (\ddot{x} - \ddot{x}_{bias}) \leq 1 \quad (14)$$

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，式(12)は，

$$F_e^T J(q)L^{-2}J(q)^T F_e \leq 1 \quad (15)$$

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．

3. PA-10 による評価実験

代表的な汎用シリアルリンクマニピュレータである PA-10(三菱重工製)を用い，手先に付加質量を把持した状態で，各関節で発生したトルクと付加質量へ伝達される力を測定し，マニピュレータの姿勢とインピーダンスマッチング度の関係性を評価した．

図1に実験で用いたマニピュレータ (PA-10, 32Kg) と付加質量 (4.5Kg)，手首部の力センサ (ピーエルオートテック社製) を示す．また実験は図2に示すように第2関節の角度を θ としたとき，図3に示すように，手先が根元関節の真上に来るように他の各関節の回転角度を決定し，次に静止した状態で各関節にステップ上の関節トルクを与えて付加質量を上方 (z 軸方向) へ急激に移動させたときの，力センサの出力と関節トルクを計測した．

まず図4に，計算の結果得られる操作力楕円体 (MFE) 及びインピーダンスマッチング楕円体 (IME) の z 軸方向の大きさ (図2の IME_z) を示す．これより，操作力

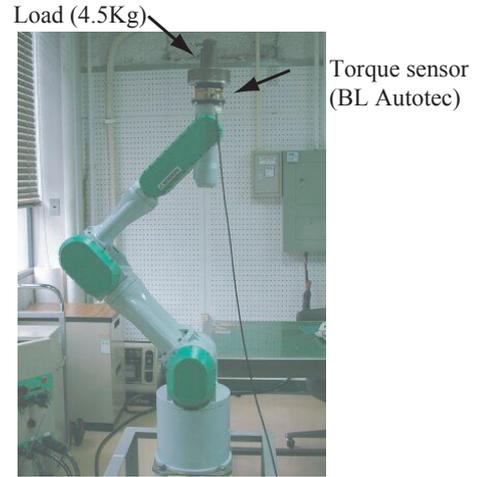


Fig.1 Experimental setup

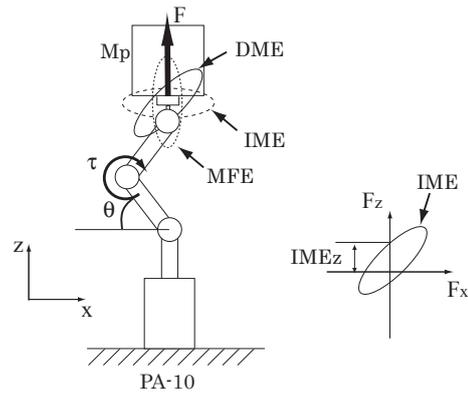


Fig.2 Definition of joint angle θ

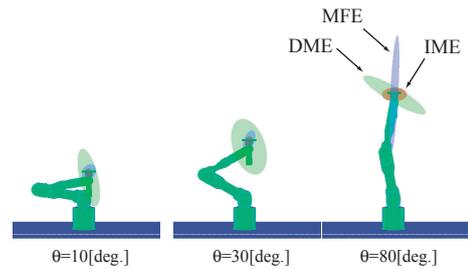


Fig.3 Configuration of experiments

楕円体では，マニピュレータが上方へ伸びきった状態になると，無限大の力が生じることが予想される．一方，インピーダンスマッチング楕円体では，マニピュレータが上方へ伸びるにつれて z 軸方向への伝達力は小さくなる．

図5に実際に実験を行った結果を示す．実験の結果，姿勢に応じた伝達係数の変化の様子は，ほぼインピーダンスマッチング楕円体から予想されるものと等しいことがわかる．ただし，実験で測定されたトルクはアクチュエータ出力軸周りであり，図5ではそれにギア比を掛け合わせて関節トルクを求めている．この際，ギアの伝達効率を考慮していないため，実験では計算値よりも若干低い伝達効率を得られている．

また，付加質量を実際に上方へ加速するのに使われた正味の力，トルクを評価するために，静止状態での

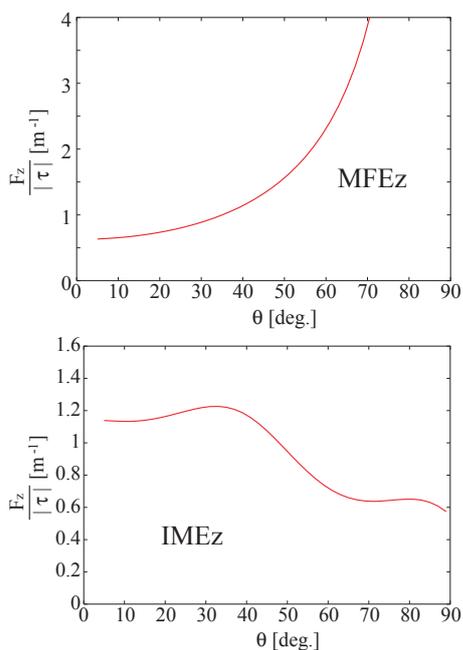


Fig.4 Calculated MFE and IME for various posture

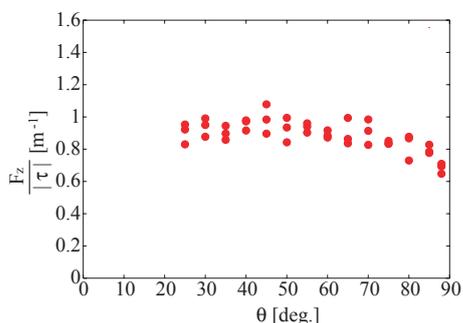


Fig.5 Measured transmission ratio from joint torque to force applied to the load

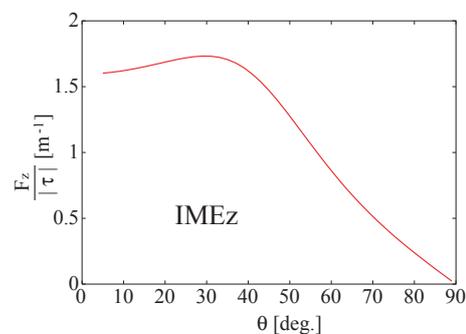


Fig.6 IMEz in the case that weight of the load and the manipulator is compensated.

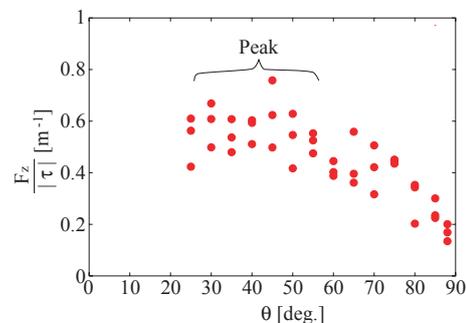


Fig.7 Measured transmission ratio from joint torque to force applied to the load

参考文献

- [1] 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.
- [2] Ryo Kurazume and Tsutomu Hasegawa. Impedance matching for a serial link manipulator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4804-4808, 2004.

マニピュレータ及び付加質量を支えるためのトルクと、付加質量を支える力をそれぞれ引き算した場合のインピーダンスマッチング楕円体の大きさを図6に示す。また同様に、図5の実験結果に対し、静止状態でのトルクと付加質量への力を減じた結果を図7に示す。

図7において、力センサのノイズのために不明瞭であるが、わずかにピークが存在することがわかる。すなわち、この姿勢で付加質量とマニピュレータの質量特性との間で、インピーダンスマッチングが実現していると考えられる。

4. おわりに

我々がこれまでに提案した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およびインピーダンスマッチング楕円体 (IME) に対し、代表的な汎用シリアルリンクマニピュレータである PA-10(三菱重工製) を用い、手先に付加質量を把持した状態で、各関節で発生したトルクと手首部の力センサからの付加質量への伝達力を測定し、様々な姿勢におけるインピーダンスマッチング度を評価した結果を報告した。今後は力センサの精度を高め、より確度の高い実験を行う予定である。