拡張した可操作性指標による二関節筋を持つロボットアームの評価

吉田 憲吾 (東京大学)， 畠 直輝 (国立身体障害者リハセンタ)， 呉 世訓， 堀 洋一 (東京大学)

Evaluation of Robot Arm Equipped with Bi-articular Muscles by Extended Manipulability Measures

Kengo Yoshida (The University of Tokyo), Naoki Hata (National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities), Sehoon Oh, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

This paper describes extended manipulability measures for robot arm based on bi-articular muscle principle. Intended robot arm has redundant actuators more than number of joints. Some of actuators drives multiple joints. Conventional measures cannot be applied to such robot arm.

In this paper, we extend three conventional measures: Manipulating-Force Ellipsoid (MFE), Dynamic Manipulability Ellipsoid (DME) and Impedance Matching Ellipsoid (IME). We defines actuator alignment matrix and introduced it into the measures. We analyze proposed measures and show their validity. Then we describe efficiency of the arm with bi-articular muscles by comparison with conventional arm.

キーワード： ロボットアーム, 二関節筋, 操作力楕円体, 動的可操作性楕円体, インピーダンスマッチング楕円
Keywords: robot arm, bi-articular muscle, Manipulating-force Ellipsoid, Dynamic Manipulability Ellipsoid, Impedance Matching Ellipsoid

1. はじめに

これまで、シリアルリンクマニピュレータの操作性を評価する指標が様々提案されてきた。古典的な物としては各関節のトルクが手先加速度に変換される関係による指標である動的可操作性楕円体 (DME) [1] [2]、静的な関節トルクが手先における力に変換される関係による指標である操作力楕円体 (MFE) といったものが挙げられる。さらに近年、倉爪らによってこれらを統合する概念としてインピーダンスマッチング楕円 (IME) という指標が提案された [3]。これはシリアルリンクマニピュレータが負荷となる物体を駆動する際に、各関節におけるトルクから物体に伝わる力の関係による指標として表わされる。

これらの指標はマニピュレータの性能評価に役立ち、冗長マニピュレータのサブタスクとしての利用といった手法が提案されてきた。しかしながら、後述する生物の機構を取り入れたロボットのような、従来のロボットにはない複雑な駆動機構を持つ対象にはうまく適用することができない。本論文ではアクチュエータの配列を行列としてこれらの指標に取り入れて拡張することで、複雑な機構を持ったロボットにもこれらの指標が適用可能にした。

従来のロボットアームと生物の四肢の駆動機構を図 1 のように比較すると、生物のアームにおいては各関節を独立に駆動するアクチュエータ (一関節筋) だけではなく、関節を跨いで駆動するアクチュエータ (二関節筋) が存在することが分かる。二関節筋の存在によって各関節トルクは独立に扱うことができなくなってしまうが、この二関節筋が持つ制御機能が注目されており、二関節筋の仕組みを持つロボットも登場している [4] [5] [6] [7]。

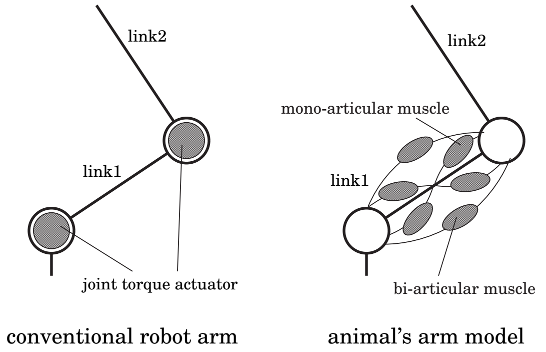


図 1　従来のロボットアームモデルと生物のアームモデル

Fig. 1. Conventional robot arm model and animal's arm model

二関節筋の存在するアームの出力特性、制御機能はこれまで実験的、解析的に明らかにされてきたが [8] [9] [10]、従来のロボット工学、制御工学で用いられる指標との対応は十分に示されてこなかった。本研究においては MFE, DME, IME の 3 つの指標を二関節筋をはじめとする複雑な構成のアクチュエータを持つマニピュレータへ拡張することで従来のロボットアームとの比較検討、また本来的に冗長性を持つ新しいロボットアームの制御への応用を狙う。

2. マニピュレータの評価指標

〈2•1〉 基となる指標　まず従来から良く知られた指標として MFE と DME を式 (1) 及び式 (2) に示す [1] [3]。

$$\boldsymbol{F}^T \boldsymbol{J(q)}(\boldsymbol{L^{-1}})^2 \boldsymbol{J(q)}^T \boldsymbol{F} \le 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$\ddot{\boldsymbol{X}}^T (\boldsymbol{M(p)J(q)}^\dagger)^T (\boldsymbol{L^{-1}})^2 (\boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger)\ddot{\boldsymbol{X}} \le 1 \quad (2)$$

ここで、$\boldsymbol{J(q)}$ はヤコビ行列、$\boldsymbol{F}$ は手先作業空間における出力、$\boldsymbol{M(q)}$ はマニピュレータの慣性行列、$\ddot{\boldsymbol{X}}$ は手先作業空間における加速度である。さらに、L は各トルクの制限値で式 (3) のように定義される。

$$\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\tau_1^{\mathrm{limit}}, \tau_2^{\mathrm{limit}}, \ldots, \tau_{\mathrm{n}}^{\mathrm{limit}}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

次にインピーダンスマッチング楕円 (IME) を示す。こちらは各関節で発生したトルクを、手先の作業対象にどのくらいの効率で伝達できるかを示す指標であり、MFE,DME の指標を含む概念である。倉爪らの文献でも例として取り挙げられているが、一般的にインピーダンスマッチングというと単一アクチュエータのギア比を求める問題を考えると理解しやすい。適切なギア比を設計することで、同じ出力トルクでも負荷に大きな加速度を与えることが可能となる [3]。

N 個の関節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ラグランジュ法等により求めることができ、式 (4) のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M(q)}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C(q,\dot{q})} + \boldsymbol{G(q)} + \boldsymbol{J(q)}^T \boldsymbol{F_e} \quad \cdot (4)$$

ここで、$\boldsymbol{M(q)}$ はマニピュレータの慣性行列、$\boldsymbol{C(q,\dot{q})}$ は速度二乗項、$\boldsymbol{G(q)}$ は重力項、$\boldsymbol{F_e}$ は手先に加わる外力である。次に手先物体の運動方程式は式 (5) と表わすことができる。

$$\boldsymbol{F_e} = \boldsymbol{M_p}(\ddot{\boldsymbol{x}} + \ddot{\boldsymbol{g}}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

ここで $\ddot{\boldsymbol{x}}$ は手先加速度、$\ddot{\boldsymbol{g}}$ は重力加速度、$\boldsymbol{M_p}$ は物体の質量である。式 (4)、式 (5) より、関節トルクを式 (6) のように表わすことが可能である。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{Q(q)}(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}}) \\ \boldsymbol{Q(q)} &= \boldsymbol{J(q)}^T + \boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger \boldsymbol{M_p}^{-1} \\ \boldsymbol{F} &= (\boldsymbol{J(q)}^T + \boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger \boldsymbol{M_p}^{-1})^\dagger \\ &\quad \times [\boldsymbol{M(q)J(q)}^\dagger (g + \dot{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{(q)}\ddot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{C(q,\dot{q})} - \boldsymbol{G(q)}] \quad (6) \end{aligned}$$

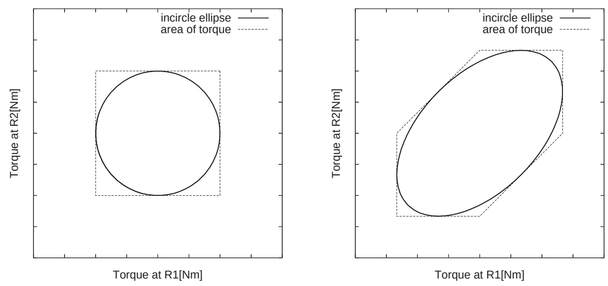
ここで F_{bias} は速度や重力の影響を表すバイアス項として捉えることができる。ここで正規化トルク $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ を式 (7) のように考える。$\boldsymbol{L}$ は式 (3) で定義した制限行列である。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{\tau} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}^T \tilde{\boldsymbol{\tau}} \le 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

この時式 (8) のように表わすことができるから、式 (6)(7)(8) より式 (9) のようにインピーダンスマッチング楕円体が定義される。

$$(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}})^T \boldsymbol{Q}^T (\boldsymbol{L^{-1}})^2 \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}}) \le 1 \quad (9)$$



without bi-articular muscles　　with bi-articular muscles

図 2　二関節筋の有無による関節トルクの取りうる領域

Fig. 2. Range of Joint Torques with or without Bi-articular Muscles

MFE 及び DME は IME の特殊な形として表される。それぞれ静止状態 ($\dot{\boldsymbol{q}} = 0$) かつ重力の影響を無視 ($\boldsymbol{G(\dot{q})} = 0, \boldsymbol{g} = 0$) した状況を考えると、$\boldsymbol{M_p} = 0$ の時式 (9) は DME と等しくなり、$\boldsymbol{M_p} = \infty$ の時 MFE と等しくなる。

〈2・2〉 複雑なアクチュエータの配列を持つマニピュレータへの拡張　ここで生物のアームのような複雑なアクチュエータの配列を持つような関節を考える。生物には図 1 のように複数の関節に跨って力を発揮するアクチュエータが存在する。これを模倣したロボットにおいては前述の指標をそのまま適用することはできない。3 つの楕円体は、関節空間において各関節トルクを出力できる領域に内接する楕円体 (図 2 左側) が、それぞれの空間に写像されたものである。二関節筋が存在すると関節トルクは独立でなくなり、トルクの取りうる領域は図 2 右側のようになる。そこでこの出力領域にうまく内接できるような拡張を行なうことにする。

まず、アクチュエータ配列行列 $\boldsymbol{A_{lign}}$ を用いて各アクチュエータの発生するトルクから、各関節トルクへの変換を式 (10) と表す。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{A_{lign}\tau_{act}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

ここで $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_n]$ とし、$\boldsymbol{\tau_{act]}} = [\tau_{act1}, \tau_{act2}, \ldots, \tau_{actm}]$ とする。$\boldsymbol{A_{lign}}$ は式 (11) によって定義され、m 番目のアクチュエータから n 番目のアクチュエータへの力の伝達係数 $a_{n,m}$ を表す。

$$\boldsymbol{A_{lign}} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \ldots & a_{m,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \ldots & a_{m,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,n} & a_{2,n} & \ldots & a_{m,n} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (11)$$

$\boldsymbol{A_{lign}}$ は一般的に正則な行列ではないので式 (10) の逆変換には擬似逆行列を用いる。ここでアクチュエータの発するトルクの制限値を式 (3) にならって、式 (12) のように表す。

$$\boldsymbol{L_{act}} = \mathrm{diag}(\tau_1^{\mathrm{actlim}}, \tau_2^{\mathrm{actlim}}, \ldots, \tau_{\mathrm{m}}^{\mathrm{actlim}}) \quad \cdots\cdots (12)$$

さらに正規化された各アクチュエータの出力トルクは式 (13) のように置くことができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}} = c_{comp}\boldsymbol{L_{act}}^{-1}\boldsymbol{A}^{\dagger}_{\boldsymbol{lign}}\boldsymbol{\tau} \quad (13)$$

ここで c_{comp} は正規化のための補正項である。よって式 (14) のように正規化されたアクチュエータの出力トルクから楕円体を導くことができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}}{}^T\tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}} \leq 1 \quad (14)$$

これにより式 (1)(2)(9) の 3 つの指標は、それぞれ以下のように拡張することが可能である。

拡張された MFE:

$$\boldsymbol{F}^T\boldsymbol{J(q)}\boldsymbol{E_{xtend}}\boldsymbol{J(q)}^T\boldsymbol{F} \leq 1 \quad (15)$$

拡張された DME:

$$\ddot{\boldsymbol{X}}^T(\boldsymbol{M(q)}\boldsymbol{J(q)}^{\dagger})^T\boldsymbol{E_{xtend}}(\boldsymbol{M(q)}\boldsymbol{J(q)}^{\dagger})\ddot{\boldsymbol{X}} \leq 1 \quad (16)$$

拡張された IME:

$$(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}})^T\boldsymbol{Q}^T\boldsymbol{E_{xtend}}\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{F_e} - \boldsymbol{F_{bias}}) \leq 1 \quad (17)$$

ただし、$\boldsymbol{E_{xtend}}$ は下記のように表される。

$$\boldsymbol{E_{xtend}} = \boldsymbol{A}^{\dagger}_{\boldsymbol{lign}}{}^T(c_{comp}^{-1}\boldsymbol{L}^{-1}_{\boldsymbol{act}})^2\boldsymbol{A}^{\dagger}_{\boldsymbol{lign}} \quad (18)$$

〈2•3〉 各楕円体の特徴量　各楕円体の特徴量を比較の指標として考え、ここでは超体積、短軸の長さ、短軸と長軸の比を取りあげる。$c_{comp}\boldsymbol{L_{act}}^{-1}\boldsymbol{A_{lign}}^{\dagger}\boldsymbol{Q}$ の特異値を大きい順に、$\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_M$ とする。ここで超体積に比例する指標として式 (19) を定義する。

$$w_v = \sigma_1^{-1}\cdot\sigma_2^{-1}\cdot\ldots\cdot\sigma_M^{-1} \quad (19)$$

これは関節トルクから全体としてどれくらい力に変換できるかという指標となる。一方、各方向への出力のバランスという観点から二つの指標を定義する。

$$w_m = \sigma_1^{-1} \quad (20)$$

$$w_r = \frac{\sigma_M}{\sigma_1} \quad (21)$$

式 (20) は楕円体の短軸の長さを表し、最低どのくらいの出力が得られるかを示す。また、式 (21) は長軸と短軸の比を表してどのくらいバランス良く出力ができるかを示す。w_r は条件数の逆数となっている。

3. 各指標の検証と二関節筋を持つアームの評価

〈3•1〉 検証及び評価に用いるモデル　ここでは検証として 2 リンクマニピュレータを考える。二つの関節に対し 3 つのアクチュエータを持ち、内一つは各関節を跨って同時に駆動する二関節筋に相当するアクチュエータである。よってアクチュエータ配列の行列 $\boldsymbol{A_{lign}}$ は式 (22) のように表わすことができる。

表 1　アームに用いたパラメータ

Table 1.　Parameters of simulation model

l_1	1.0[m]	l_2	1.0[m]
m_1	1.0[kg]	m_2	0.5[kg]

$$\boldsymbol{A_{lign}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}^{\dagger}_{\boldsymbol{lign}} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}^T \quad (22)$$

さらに $c_{comp} = \sqrt{2}$ とする。性能評価に関しては各アクチュエータの制限値として全てのアクチュエータの大きさが同じ場合 (ケース 1) と、二関節筋に相当するアクチュエータが倍の大きさの場合 (ケース 2) を考える。それぞれのトルク制限行列 $\boldsymbol{L_{act}}$ は以下の式 (23)(24) として表わされる。

$$\boldsymbol{L_{act1}} = \mathrm{diag}(\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3}) \quad (23)$$

$$\boldsymbol{L_{act2}} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1) \quad (24)$$

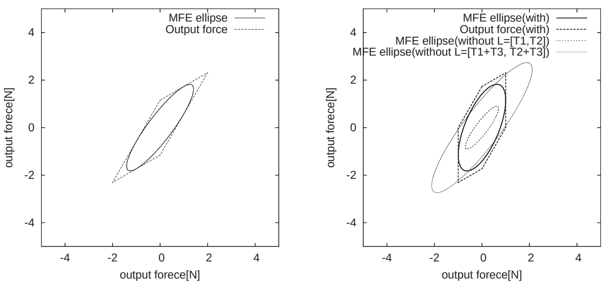
比較対象として $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1, 1)$ とする、それぞれの関節に独立したアクチュエータを持つ従来のマニピュレータを挙げる。ケース 1 とケース 2 に対してアクチュエータの出力の和が等しくなるという条件下で評価を行なう。

アームのリンク長、重量については特に断わりのない限り表 1 に従う。リンクは一様な厚みや幅のない棒として考える。

〈3•2〉 拡張した MFE の検証　式 (15) で示されるような拡張された操作力楕円体の検証を行なう。手先出力に関しては式 (25) より直接求める。

$$\boldsymbol{F} = (\boldsymbol{J}^{\dagger})^{-1}\boldsymbol{\tau} \quad (25)$$

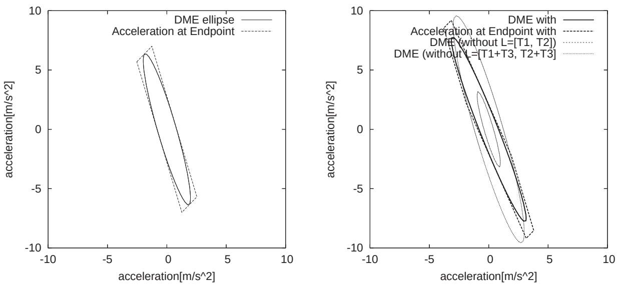
まず従来のアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1, 1)$ の手先出力の取りうる領域と MFE の関係を図 3 の左図に示す。ここで各関節角は $\boldsymbol{\theta} = [30°, 60°]$ である。手先出力の取りうる領域に MFE が内接していることが分かる。また楕円の主軸は出力の最大となる方向、最小となる方向に対応していることが分かる。次に二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1)$ について同様に手先出力の取りうる領域と拡張した MFE の値の関係を図 3 の右図に示す。ここでも拡張された MFE が出力領域に内接でき、主軸の方向に関してもうまく特性を表わしていることが分かる。同時に拡張前の MFE を重ねて表示しているが、内側の楕円は $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\tau_1, \tau_2)$ として二関節筋を取り除いた時の物、また外側の楕円は $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\tau_1 + \tau_3, \tau_2 + \tau_3)$ として二関節筋のトルクが各関節に独立に振り分けられるとして算出したものである。これにより、出力の大きさ、方向ともに大きくずれてしまい二関節筋の持つアームの特性を従来の MFE ではうまく表現することができいことが分かる。



without bi-articular muscles　　with bi-articular muscles

図 3　二関節筋の有無による MFE と手先出力の取りうる領域

Fig. 3. MFE and Range of Distal Output Force with or without Bi-articular Muscles



without bi-articular muscles　　with bi-articular muscles

図 4　二関節筋の有無による DME と手先加速度の取りうる領域

Fig. 4. DME and Range of Distal Acceleration with or without Bi-articular Muscles

〈3•3〉 拡張した DME の検証 　同様に式 (16) で示される拡張された動的可操作性楕円体の検証を行なう。手先加速度に関しては式 26 より直接求めて比較する。

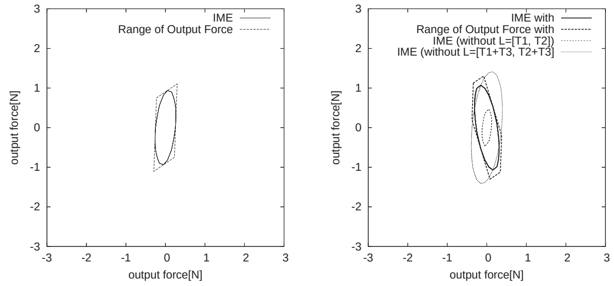
$$\ddot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{M_q}^{-1}\boldsymbol{\tau} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (26)$$

操作力楕円体と同様に、従来のアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1, 1)$ の手先加速度の取りうる領域と DME の関係を図 4 の左図に示す。関節角は同様に $\boldsymbol{\theta} = [30°, 60°]$ である。一方二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1)$ についても図 4 の右図に示す。DME はそれぞれ手先加速度の取りうる領域に内接し、拡張した DME はうまく二関節筋を備えるアームの特徴を示していると言える。

〈3•4〉 拡張した IME の検証 　次に式 (17) で示される拡張されたインピーダンスマッチング楕円体の検証を行なう。把持物体に与える力の領域は式 27 より直接求めて比較する。

$$\boldsymbol{F_e} = \boldsymbol{Q}^{\dagger}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{F_{bias}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (27)$$

ここで把持物体の質量を 0.5kg とし、水平面内で静止した状態を考える。この時 $\boldsymbol{F_{bias}}$ 項は 0 となる。IME も同様に従来のアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1, 1)$ の把持物体に与える力の取りうる領域と IME の関係を図 5 の左図に示す。関節角は同様に $\boldsymbol{\theta} = [30°, 60°]$ である。一方二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1)$ についても図 5 の右図に示す。IME はそれぞれ把持物体に与える力の取りうる領域に内接し、拡張した IME はうまく二関節筋を備えるアームの特徴を示していると言える。



without bi-articular muscles　　with bi-articular muscles

図 5　二関節筋の有無による IME と把持物体に与える力の取りうる領域

Fig. 5. IME and Range of Output Force acting on an Object with or without Bi-articular Muscles

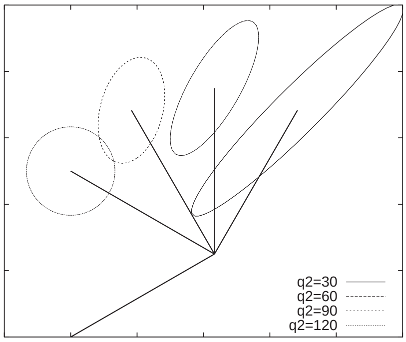
〈3•5〉 各姿勢における楕円体の形状の変化 　ケース 1、ケース 2 それぞれのアームに対して、姿勢による各楕円体の形状の変化を図 6 に示す。姿勢は腕を曲げた状態 ($\boldsymbol{\theta} = [30°, 120°]$)、中間の状態 ($\boldsymbol{\theta} = [30°, 60°]$)($\boldsymbol{\theta} = [30°, 90°]$)、腕を伸ばした状態 ($\boldsymbol{\theta} = [30°, 30°]$) についてそれぞれ示す。

〈3•6〉 二関節筋を持つアームの性能評価 　ここで二関節筋を持つアームと従来のアームについて 3 つの楕円体から式 (19)〜(21) の指標に関して性能評価を行なう。各アームについて θ_1 を固定して、θ_2 を 0 から π まで変化させて各指標がどのように変化するかを調べる。

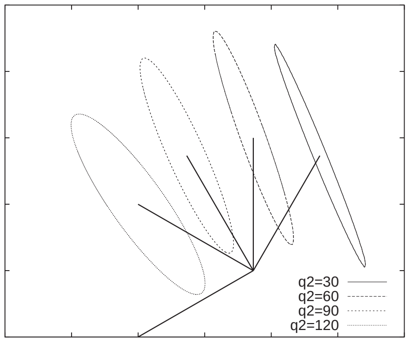
まず MFE に関して図 7 に楕円体の面積 w_v、楕円体の短軸 w_m を、楕円体の短軸と長軸の比 w_r を示す。ケース 1 では 1.5 倍、ケース 2 でも 1.2 倍に w_v は増加している。また出力バランスに関してはケース 1 で大きく改善が見られ、特に腕を伸ばした姿勢の領域については大きく上回っている。腕を深く曲げた一部領域においてわずかに下回る場合があるが、w_m から明らかなように各姿勢において最低となる出力は上回っている。

同様に DME に関して図 8 に、IME に関して図 9 に示す。DME に関しては w_v に関してはケース 1、ケース 2 ともに従来のアームを上回っている。一方、w_m に関してはケース 1 ではほぼ全域で上回っているものの、ケース 2 においては下回る結果となった。さらに w_r についてはケース 1、ケース 2 ともに下回る結果になり、二関節筋の存在はバランスのよい出力をうながすのではなく、特定の方向への加速度を強めてしまう結果になっており、MFE とは異なる。

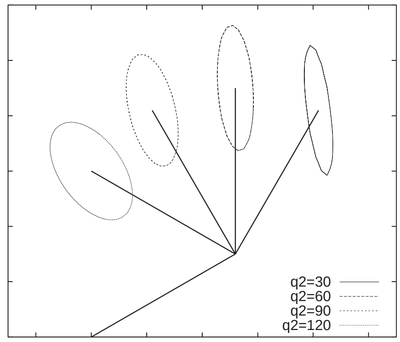
IME に関しては各指標において MFE と DME の中間の特性が得られた。これは IME のそもそもの性質を考えれば極めて妥当であると考えられる。



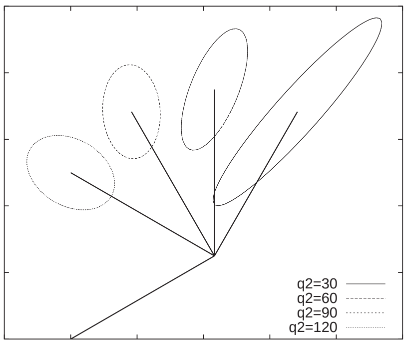
MFE (case 1)



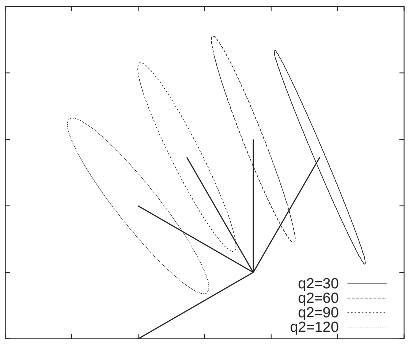
DME (case 1)



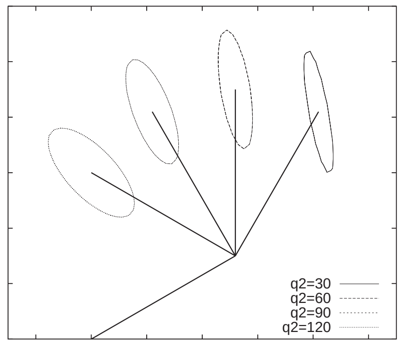
IME (case 1)



MFE (case 2)



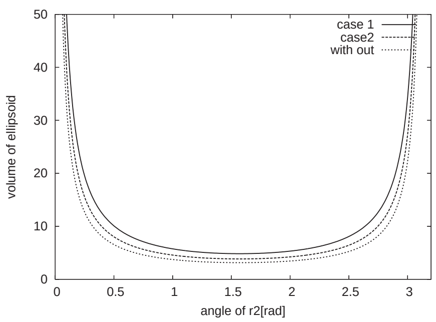
DME (case 2)



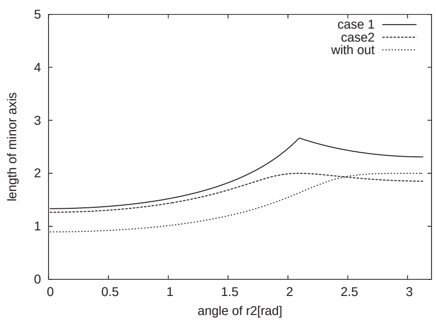
IME (case 2)

図 6　拡張した各楕円体の姿勢による比較

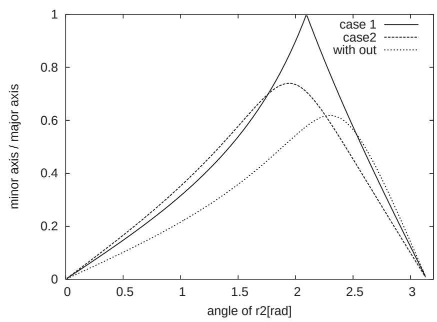
Fig. 6.　Comparison of Extended Each Ellipsoid in Various Postures



面積 w_v



短軸 w_m



比 w_r

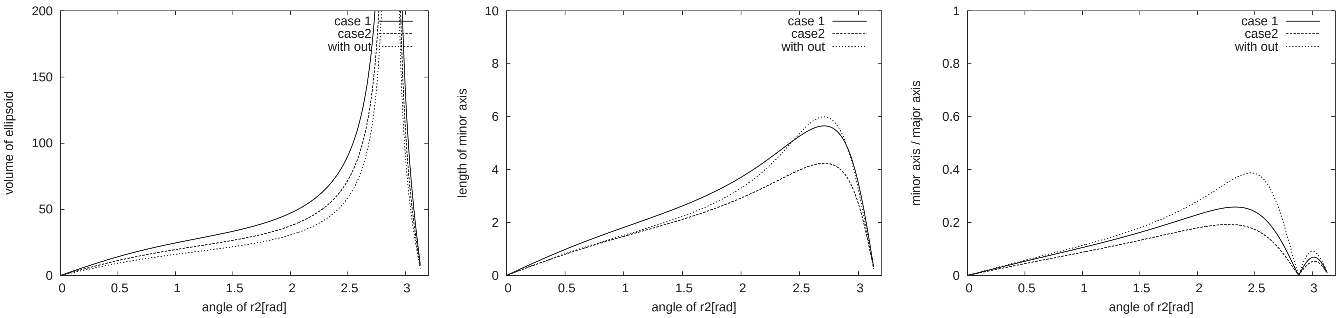
図 7　二関節筋を持つアームの MFE による性能比較

Fig. 7.　Comparison of Manipulability of the Arm with Bi-articular Muscles in MFE

4.　まとめと今後の課題

本研究によってはマニピュレータの操作性を表す指標である MFE, DME, IME に関して、各関節が独立ではない複雑なアクチュエータの配列を持つマニピュレータに関しても適用できるような拡張を行った。これらの楕円体がそれぞれ手先における力 (あるいは加速度) の取りうる領域に内接していることを示し、拡張した指標の妥当性を確かめた。一方、二関節筋を持つロボットアームに関してアクチュエータの比率を変えた二つのケースに関して、従来のロボットアームとトータルのアクチュエータの出力をそろえて比較を行なった。またこの際各楕円体の 3 つの特徴量を比較の指標として用いた。この結果特に、特に MFE で著しい二関節筋を持ったアームの有効性を確認した。また、DME においても一定の性能の改善がみられることを示した。IME に関しては双方の中間程度の特性を示し、これは IME の性質からいっても非常に妥当である。

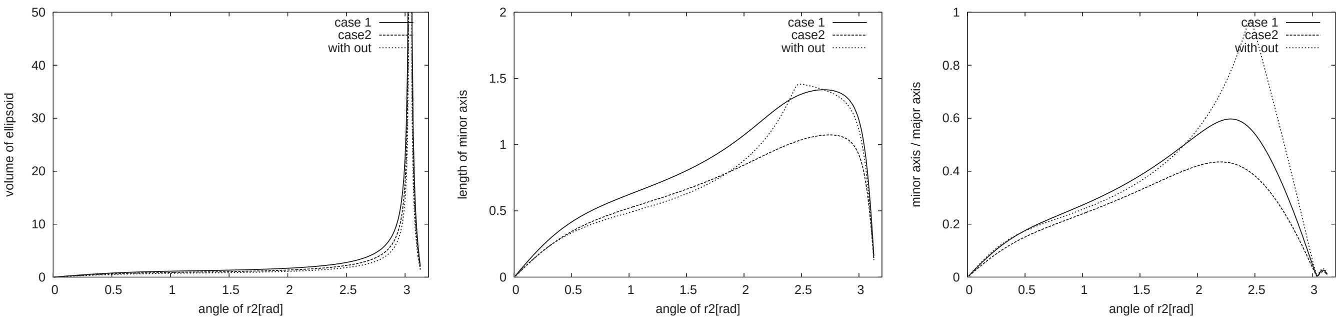
今回拡張した指標によって従来型のロボットと新しいロボットとの比較検証が統一的に行なえるようになる。また新しいロボットアームのアクチュエータの比の設計に関しても効果的に行なうことが可能である。また、対象として定めた新しいロボットアームは、本来的に冗長性を持つた



面積 w_v　　短軸 w_m　　比 w_r

図 8　二関節筋を持つアームの DME による性能比較

Fig. 8.　Comparison of Manipulability of the Arm with Bi-articular Muscles in DME



面積 w_v　　短軸 w_m　　比 w_r

図 9　二関節筋を持つアームの IME による性能比較

Fig. 9.　Comparison of Manipulability of the Arm with Bi-articular Muscles in IME

め、これをうまく消化するためのサブタスクとしての応用が考えられる。これら応用の他、数学的な厳密性の検証もさらに必要であると考えられ、これらが今後の課題である。

文　献

（1） Tuneo Yoshikawa, “Dynamic Manipulability of Robot Manipulators”, Jounal of Robotic Systems, vol. 2, No. 1, pp. 113 - 124, 1985

（2） Stephen L. Chiu, “Task Compatibility of Manipulator Postures”, The International Journal of Robotics Research, vol. 7, No. 5, pp. 13 - 21, 1988

（3） Ryo Kurazume and Tutomu Hasegawa, “Impedance matching for a serial link manipulator”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2004

（4） Kengo Yoshida, Naoki Hata, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “A Novel Design and Realization of Robot Arm Based on the Principle of Bi-articular Muscles”, Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2006. 12

（5） Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Novel FF Control Algorithm of Robot Arm Based on Bi-articular Muscle Principle - Emulation of Muscular Viscoelasticity for Disturbance Suppression and Path Tracking -”, IEEE IECON 2007, 2007

（6） Toru Oshima, Noboru Momose and Kiyoshi Toriumi, “Jump mechanism using coordination in knee and ankle joint and application to leg orthosis” , The 2005 International Power Electronics Conference, 2005

（7） Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, Yasuo Kuniyoshi, “A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeltal system”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007

（8） G. J. van Ingen Shenau, M. F. Bobbert and R. H. Rozendal, “The unique action of bi-articular muscles in complex movements”, Journal of Anatomy, 155, pp. 1-5, 1987

（9） F. A. Mussa Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi, “Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subserving Arm Posture in Humans”, The Journal of Neuroscience, Vol. 5, No. 10, pp. 2732-2743, 1985

（10） Mizuyori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto, “Control properties induced by existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles -Mechanical engineering model analyses”, Human Movement Science 13, pp. 611-634, 1994