精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会
第 12 回例会

可操作性指標の二関節筋を持つアームへの拡張

吉田 憲吾 **, 畠 直輝 ***, 呉 世訓 **, 堀 洋一 **

Extended Manipulability Measures for Robot Arm Equipped with Bi-articular Muscles

Kengo Yoshida, Naoki Hata, Sehoon Oh, Yoichi Hori

This paper describes extended manipulability measures for robot arm based on bi-articular muscle principle. Such robot arm has redundant actuators more than number of joints and some of the actuators drives multiple joints. Conventional measures cannot be applied to such robot arm. We extend three conventional measures: Manipulating-Force Ellipsoid (MFE), Dynamic Manipulability Ellipsoid (DME) and Impedance Matching Ellipsoid (IME). MFE and DME are typical case of IME. We analyze proposed measures and show their validity. Extended IME can represent dynamic torque-force transmission of intended robot arm accurately. Then properties of robot arm with bi-articular muscles are described by comparison with conventional arm.

Key words: Bi-articular Muscles, Impedance Matching Ellipsoid, Manipulating-force Ellipsoid, Dynamic Manipulability Ellipsoid

1. はじめに

1980 年代から 90 年代にかけて、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。また近年、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や冗長マニピュレータのサブタスクとしての利用がなされてきた。

二関節筋を持つロボットにおいては、これらの操作指標を利用しようという取り組みが畠によってなされたが、指標に関しては従来のものがそのまま用いられた [4)]。しかしながら、二関節筋のように各関節の独立を失わせるアクチュエータを持つマニピュレータにおいては、従来の指標は本来うまく適用することができない。著者らの以前の研究において、アクチュエータの配列を行列として操作性指標に取り入れることで二関節筋を持つマニピュレータへの適用を可能としたが、各アクチュエータの比によってはうまく特性を表すことができない等の問題点もあった [5)]。本稿においては、関節トルク空間において取りうる領域に着目することでこれらの問題点を解決した指標について述べる。

* 原稿受付　　　平成 18 年　8 月　25 日
** 東京大学大学院 工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)
*** 国立身体障害者 リハセンタ（埼玉県所沢市並木 4-1）

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)]。

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

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

ここで、$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$ はヤコビ行列、$\boldsymbol{F}$ は手先作業空間における出力、$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ 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。

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

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。

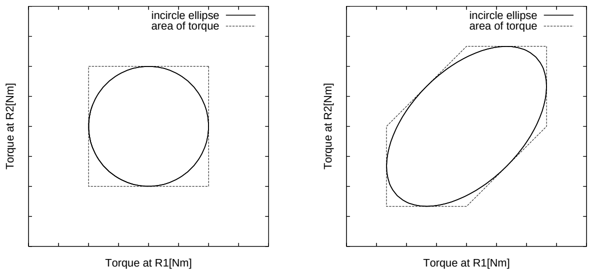
$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^T \boldsymbol{F_e} \quad (4)$$

ここで、$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ はマニピュレータの慣性行列、$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ は速度二乗項、$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$ 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。

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

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

(2008 年 8 月 23 日開催)



without bi-articular muscles　　with bi-articular muscles

Fig. 1 Range of Joint Torques with or without Bi-articular Muscles

わすことが可能である。

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

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。

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

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}^T\tilde{\boldsymbol{\tau}} \leq 1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

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。

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

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 **2** 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 **1** 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 **1** 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。

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

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。

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

$\boldsymbol{A_{lign}}$ 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。

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

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。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}}_{\boldsymbol{act}} = c_{omp}(\boldsymbol{L_{act}}\boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger}\boldsymbol{\tau} \quad \ldots\ldots \quad (13)$$

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。

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

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:

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

拡張された DME:

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

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。

$$\boldsymbol{E_{xtend}} = c_{omp}^2(\boldsymbol{L_{act}}\boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger T}(\boldsymbol{L_{act}}\boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger} \quad (18)$$

2.3 3 対 6 筋を持つ 2 リンクマニピュレータへの適用

ここでは c_{omp} が二関節筋を持つ 2 リンクマニピュレータの際にどのように定義されるかを示す。図**??**に示すように、二関節筋を持つマニピュレータではトルクの取りうる領域は六角形を書き、楕円の拡大縮小によって各辺に接するように c_{comp} が調整される。各トルクが正負対称に出力できるとすると、図中の A(A') の辺、B(B') の辺、C(C') の辺に接するための c_{omp} の値を計算し、その最大の物を選べば良い (式 (19))。

$$c_{omp} = \max(c_{compA}, c_{compB}, c_{compC}) \quad \ldots\ldots \quad (19)$$

ここで、

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{L_{act}}\boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger T}(\boldsymbol{L_{act}}\boldsymbol{A_{lign}})^{\dagger} &= \begin{pmatrix} e_{1,1} & e_{2,1} \\ e_{1,2} & e_{2,2} \end{pmatrix}\\ L_{act} &= \mathrm{diag}(\tau_1^{actlim}, \tau_2^{actlim}, \tau_3^{actlim}) \quad \ldots \quad (20)\end{aligned}$$

式 (20) のように置くと、辺 A, 辺 B, 辺 C と接っする条件から導かれる c_{compA},c_{compB},c_{compC} の値はそれぞれ式 (21,22,23)

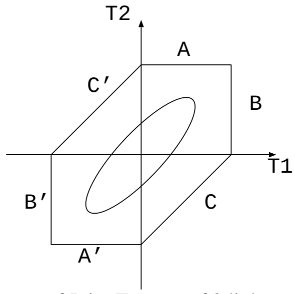


Fig. 2 Range of Joint Torques of 2 link manipulator

のように置くことができる。

$$c_{compA} = \frac{1}{\tau_2^{actlim} + \tau_3^{actlim}} \sqrt{\frac{4e_{1,1}}{4e_{1,1}e_{2,2} - (e_{2,1}+e_{1,2})^2}} \quad (21)$$

$$c_{compB} = \frac{1}{\tau_1^{actlim} + \tau_3^{actlim}} \sqrt{\frac{4e_{2,2}}{4e_{1,1}e_{2,2} - (e_{2,1}+e_{1,2})^2}} \quad (22)$$

$$c_{compC} = \frac{4(e_{1,1}+e_{1,2}+e_{2,1}+e_{2,2})}{(\tau_1^{actlim}+\tau_2^{actlim})^2\{4e_{1,1}e_{2,2}-(e_{1,2}+e_{2,1})^2\}} \quad (23)$$

2.4 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 (24) を定義する。

$$w_v = \sigma_1^{-1} \cdot \sigma_2^{-1} \cdot \ldots \cdot \sigma_M^{-1} \quad (24)$$

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。

$$w_m = \sigma_1^{-1} \quad (25)$$

$$w_r = \frac{\sigma_M}{\sigma_1} \quad (26)$$

式 (25) 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 (26) 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 (27) のように表わすことができる。

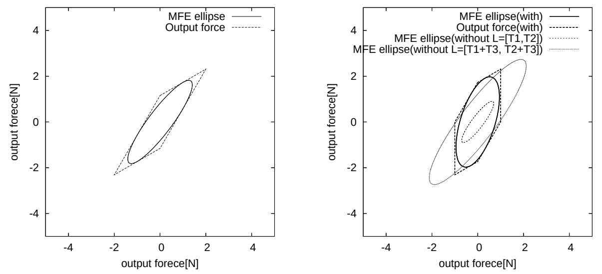
$$\boldsymbol{A_{lign}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

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 (28)(29) として表わされる。

$$\boldsymbol{L_{act1}} = \mathrm{diag}(\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3}) \quad (28)$$

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]



without bi-articular muscles　　with bi-articular muscles

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

$$\boldsymbol{L_{act2}} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1) \quad (29)$$

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 (30) より直接求める。

$$\boldsymbol{F} = (\boldsymbol{J}^{\dagger})^{-1}\boldsymbol{\tau} \quad (30)$$

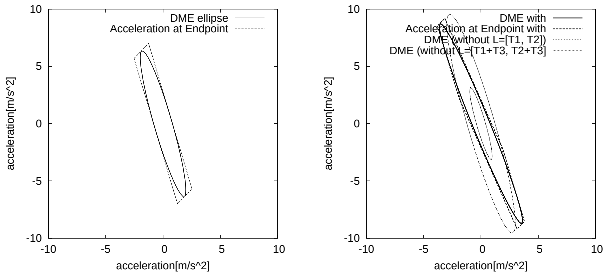
まず従来のアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(1,1)$ の手先出力の取りうる領域と MFE の関係を図 **3** の左図に示す。ここで各関節角は $\boldsymbol{\theta} = [30°, 60°]$ である。手先出力の取りうる領域に MFE が内接していることが分かる。また楕円の主軸は出力の最大となる方向、最小となる方向に対応していることが分かる。次に二関節筋に相当するアクチュエータを備えるアーム $\boldsymbol{L} = \mathrm{diag}(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1)$ について同様に手先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。

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 31 より直接求めて比較する。

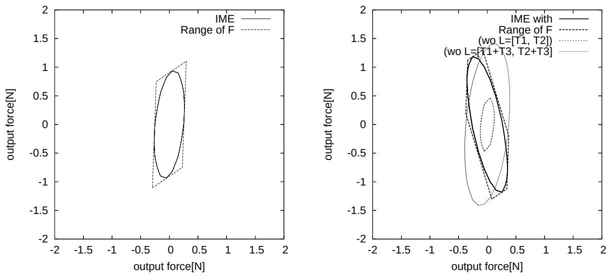
$$\ddot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{M_q}^{-1}\boldsymbol{\tau} \quad (31)$$

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



without bi-articular muscles　　　with bi-articular muscles

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



without bi-articular muscles　　　with bi-articular muscles

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

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 32 より直接求めて比較する。

$$\boldsymbol{F_e} = \boldsymbol{Q}^{\dagger}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{F_{bias}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (32)$$

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 $\boldsymbol{\theta} = [30^\circ, 60^\circ]$ 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。

3.5 各姿勢における楕円体の形状の変化

ケース 1 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 ($\boldsymbol{\theta} = [30^\circ, 120^\circ]$)、中間の状態 ($\boldsymbol{\theta} = [30^\circ, 60^\circ]$)($\boldsymbol{\theta} = [30^\circ, 90^\circ]$)、腕を伸ばした状態 ($\boldsymbol{\theta} = [30^\circ, 30^\circ]$) 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 (24)〜(26) 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。

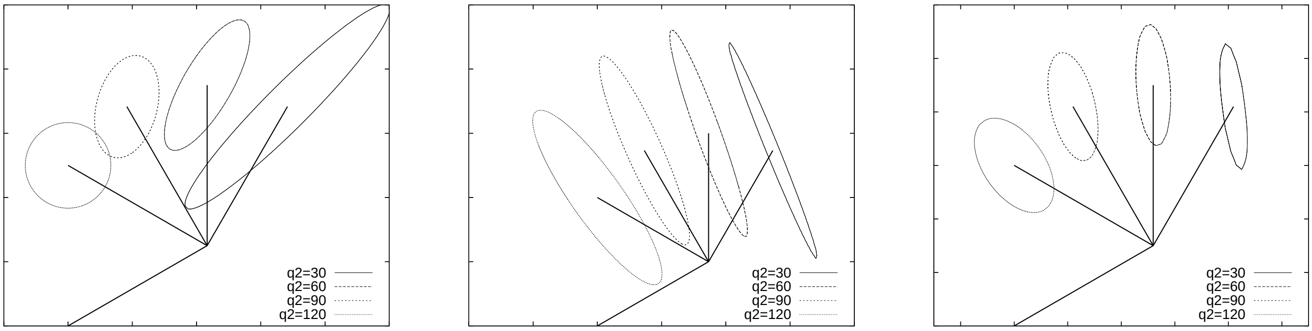
4. まとめと今後の課題

本研究では、マニピュレータの操作性を表す指標である MFE, DME, IME に関して二関節筋のように各関節の独立を持たないアームへの適用を可能とするような拡張を行なった。以前の手法での問題点を、関節トルク空間においてマニピュレータが取りうる領域に着目することで解決し、各指標についてその妥当性を確認した。さらに、楕円体の特徴量として、超体積、長軸短軸の比、短軸の長さという 3 つを取りあげ、従来のアームと、各アクチュエータの比を変更した二関節筋を持つアームについてこれを適用して比較を行なった。

今後の発展としては、提案指標を生かしたロボットアームの設計手法、二関節筋を持つアームにおいてサブタスクとして冗長性を消化する手法といった応用が挙げられる。また課題としては、2 リンク以上のアームへの対応、またさらにリンクに冗長性を持つ場合の対応といったものが挙げられる。

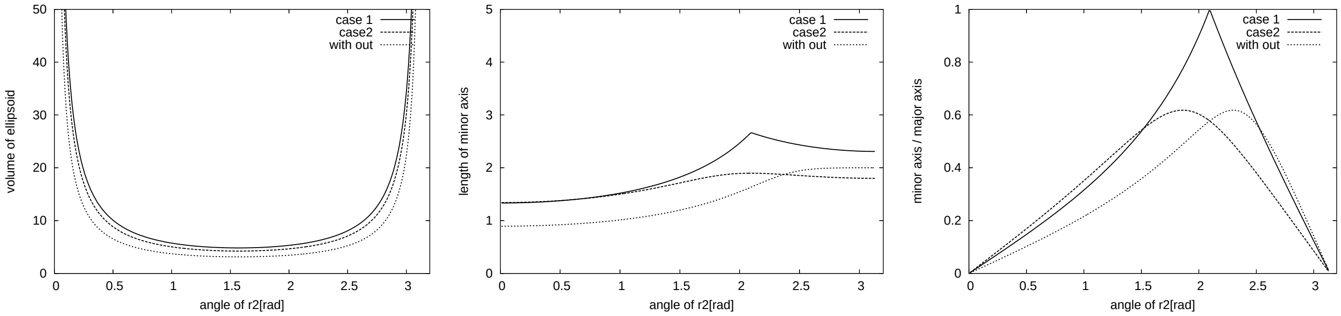
参 考 文 献

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) 畠直輝, ”系先端負荷と加速度を考慮した動的特性”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 第 11 回例会, 2008. 2
5) 吉田憲吾, 畠直輝, 呉世訓, 堀洋一, ”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”, 電気学会産業応用部門大会, 2008. 8 (発表予定)



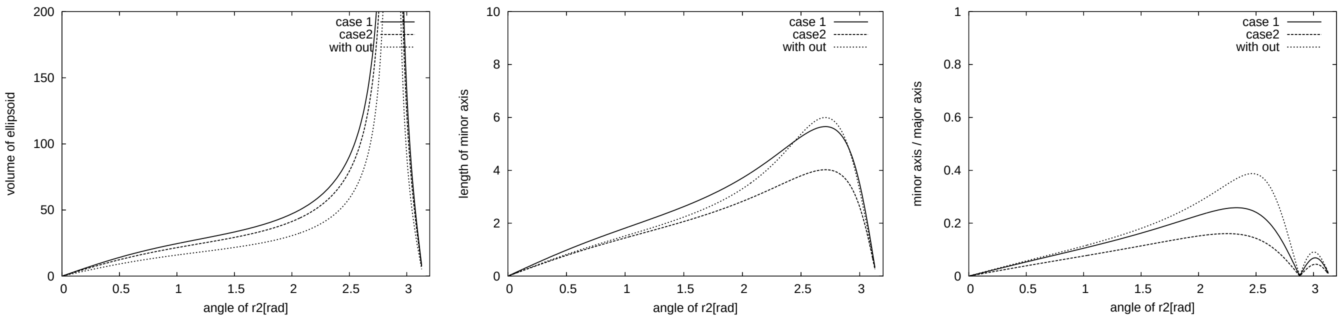
MFE (case 1) DME (case 1) IME (case 1)

Fig. 6 Comparison of Extended Each Ellipsoid in Various Postures



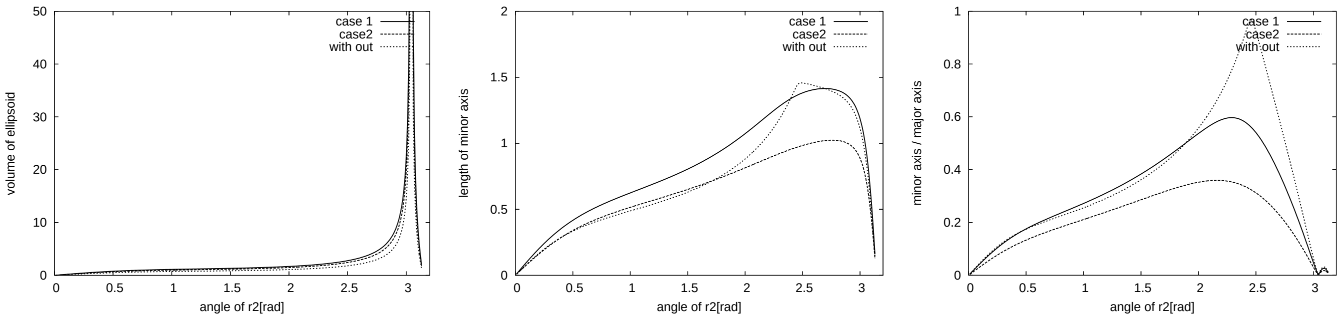
面積 w_v 短軸 w_m 比 w_r

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



面積 w_v 短軸 w_m 比 w_r

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

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