

障害物の影響を考慮した マニピュレータの可操作度

古 庄 純 次* 白 井 広 幸* 佐 野 明 人*

マニピュレータの制御あるいは作業計画に際して、手先効果器の操作性能を定量的に表す尺度があれば有用である。本報告では、障害物のある環境下におけるマニピュレータの能力を運動学的な見地から評価する一つの方法を提案する。

マニピュレータに接近した障害物は、マニピュレータの運動に多くの拘束を与える。本報告では、二つの場合を扱う。一つは、障害物を避けるために関節速度ベクトルが等式拘束を満たさねばならない場合である。他の一つは、障害物に接近する速度が制限される場合である。各々の場合に対して、著者らは可操作性楕円体および可操作度を導いた。最後に一つの例として、8自由度を持つマニピュレータを用いて行った実験およびシミュレーションを示す。この実験では、狭いスリットを通して手先効果器を差し込み、本報告で提案した可操作度を大きな値に保ちながら関節角速度が制御される。

1. はじめに

近年吉川^{1,2)}および内山ら³⁾は、マニピュレータの運動学的な操作性を表す尺度として可操作度（あるいは機構性能の評価）の概念を提案した。この概念は、マニピュレータの機構評価や、対象物をどの位置に置けば作業性が良いかを評価する有効な指標となる。

さらに、無人搬送車などの移動ロボットにマニピュレータが搭載されている場合や、マニピュレータが工場内のレール上を移動して作業する場合に、どの位置で止めて作業をすれば良いかを定める際にも有効な指標となる。

また、冗長性を有するマニピュレータにおいては、その自由度における冗長性を利用して作業性がよい姿勢を保ちながら作業を行うことも可能であるが、その際の作業性の評価関数としても使うことができる^{5,9,10)}。

本研究では、障害物が存在する環境下におけるマニピュレータの運動学的な操作性を定量的に表す1つの方法を提案する。障害物の存在する環境下では、マニピュレータの運動に拘束が生じ、その操作性が著しく低下することがある。このような時、障害物がない場合と比べて問題が複雑であるため、その運動学的な操作性を直感的に判断することは非常に難しくなる。そこで、その操作性を定量的に評価することが、障害物の存在する環境下では特に重要になる。

2節では、基本的な式の定義について述べ、さらにマニピュレータの操作性に関して従来得られた結果^{1~4)}のうちで、本研究の議論を進める上で必要となる可操作性楕円体について簡単に述べる。本研究では、この可操作性楕円体の概念を、障害物のある環境下におけるマニピュレータの操作性を評価するために拡張する。障害物ゆえに生じる拘束条件としては次の二つの場合を考えた。

3節では、スリットにマニピュレータを差し込みながら作業をする場合のように、マニピュレータの関節速度が等式の拘束を満たさねばならない場合を考え、この時の可操作性楕円体および可操作度の誘導法を与えた。

4節では、障害物方向への速度が零ではなく、ある範囲内であれば許される場合を考え、この時の可操作性楕円体および可操作度の誘導法を与えた。

5節では、8リンクマニピュレータに対して、本研究で提案した可操作度を適用し、可操作度が大きくなるように制御実験した一つの例を示す。

2. 障害物がない時の可操作性楕円体及び可操作度

n 自由度を有するマニピュレータに対し、その第 i 関節の関節変数を θ_i 、その関節ベクトルを

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \quad (1)$$

とする。また手先効果器の位置及び姿勢を示す m 次ベクトルを

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (2)$$

原稿受付 1987 年 9 月 16 日

* 岐阜大学工学部

とする。多くの場合 $m=n$ であるが、 $m < n$ の場合もあり、このときマニピュレータは冗長性を持つと言われる。

関節ベクトル θ が決まると、 x は一意に決まるので、その関係を次のように表すことにする。

$$x=f(\theta) \quad (3)$$

このとき、各関節の速度と手先効果器の速度の関係は次のように表される。

$$\dot{x}=J(\theta)\dot{\theta} \quad (4)$$

ここで、 $J(\theta)=\partial f(\theta)/\partial \theta \in R^{m \times n}$ である。

関節速度ベクトル $\dot{\theta}$ が手先効果器にどのような影響を与えるかを評価するため、吉川^{1,2)}、内山ら³⁾は次のような方法を提案し、そのマニピュレータ機構の評価及び制御への応用について興味深い議論をしている。ここでは、本研究における議論を進める上で必要な要点を吉川の議論に従ってまとめておく。

$$\|\dot{\theta}\|=\sqrt{\dot{\theta}_1^2+\dot{\theta}_2^2+\cdots+\dot{\theta}_n^2}\leq 1 \quad (5)$$

を満足するような関節速度 $\dot{\theta}$ を用いて実現することのできる手先効果器の速度 \dot{x} のすべてからなる集合

$$S=\{\dot{x}|\dot{x}=J\dot{\theta}, \|\dot{\theta}\|\leq 1\} \quad (6)$$

を考える。この集合 S の形から、手先効果器がどのように動き得るかが分かる。

(6) 式から分かるように、集合 S は楕円体である。楕円体の形を示すには、その主軸を用いて表すのがもっとも明確である。主軸を求めるため、 J を次のように特異値分解⁴⁾する。ただし、 $\text{rank } J=m$ とする。

$$J=U\Sigma V^T \quad (7)$$

ここで

$$\Sigma=\begin{pmatrix} \sigma_1 & & & & \\ & \sigma_2 & & & \\ & & \cdots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \sigma_m \\ & & & & & 0 \end{pmatrix} \in R^{m \times n} \quad (8)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_m \geq 0 \quad (9)$$

$$U=[u_1, u_2, \cdots, u_m] \quad (10)$$

であり、 $U \in R^{m \times m}$ 、 $V \in R^{n \times n}$ は直交行列である。

(7) 式について考えると、 V^T は直交行列であるから座標の回転を意味し、 Σ は各座標軸方向に適当な倍率だけ伸縮させることを意味し、 U は直交行列であるので適当な角度だけ回転させることを意味する。すなわち、(6) 式の集合 S は、 $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ で与えられる単位球を回転し、各座標軸方向に伸縮し、さらに U だけ回転することによって得られるので、その主軸を $\sigma_1 u_1, \sigma_2 u_2, \cdots, \sigma_m u_m$ とする楕円体であることが分かる。

吉川はこの楕円体に可操作性楕円体という名前を付けた^{1,2)}。この楕円体を直接図示することによってマニピ

ュレータの可操作性を表現できるのは、 m が 3 以下の場合に限られる。そこで、情報を 1 つのスカラ量に圧縮して表すことが提案されている。

一つは、この楕円体の体積 V

$$V=\{\pi^{m/2}/\Gamma[(m/2)+1]\}\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_m \quad (11)$$

を(あるいは、それに対応する $\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_m$ を)評価とする方法^{1~3)}であり、他の一つは条件数⁶⁾

$$c(J^T)=\sigma_1/\sigma_m \quad (12)$$

を評価とする方法⁴⁾である。

このように、実現可能な手先効果器の速度 \dot{x} の集合を楕円体で表すと、スカラ値の評価が簡単に求まるという利点もある。

3. 関節速度が等式拘束を満たす必要がある場合の可操作性楕円体および可操作度

例えば Fig. 1 に示すように、狭いスリットに 3 リンクアームを差し込んで、アームをスリットの中央に保持しながら作業をするとき、関節速度は次式を満たす必要がある。

$$b_1\dot{\theta}_1+b_2\dot{\theta}_2+b_3\dot{\theta}_3=0 \quad (13)$$

ここで

$$\begin{cases} b_1=c_{12}y_s-c_{12}l_1+s_{12}x_s \\ b_2=c_{12}y_s-c_{12}l_1+s_{12}x_s-c_2l_2 \\ b_3=0 \end{cases}$$

であり、 l_1, l_2 は第 1, 第 2 リンクの長さ、 (x_s, y_s) はスリット中央の座標、 s_{12}, c_{12}, c_2 はそれぞれ $\sin(\theta_1+\theta_2), \cos(\theta_2), \cos(\theta_1+\theta_2)$ を意味する。

このような場合を一般的に表すと

$$B\dot{\theta}=0, B \in R^{r \times n} \quad (14)$$

となる。ただし $\text{rank } B=r, n-r \geq m$ とする。

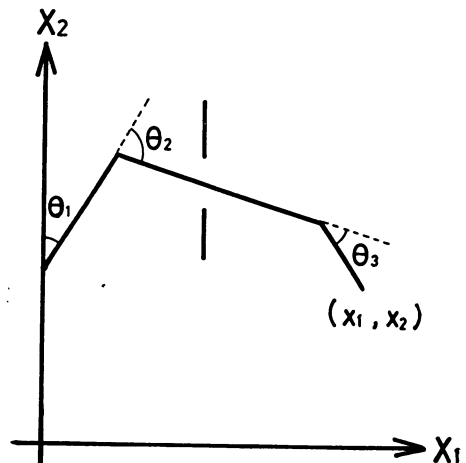


Fig. 1 3-link Manipulator ($l_1=0.6, l_2=0.85, l_3=0.3$)

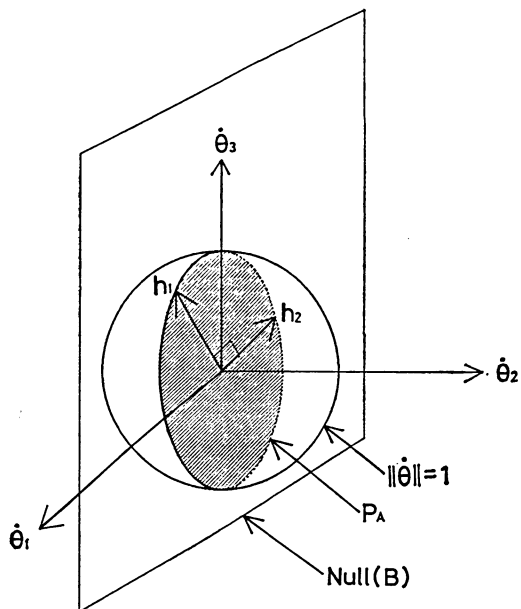
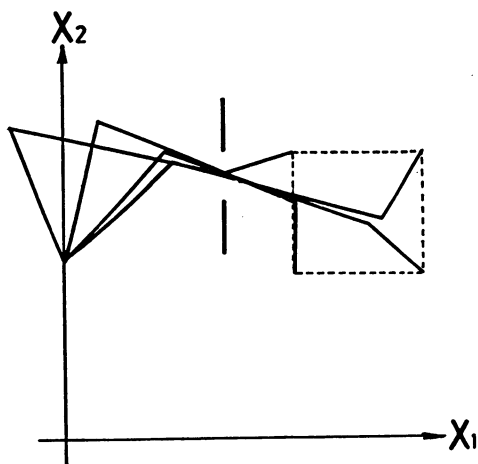


Fig. 2 Set of Admissible Joint Velocity Vectors, P_A

本節では、関節速度ベクトルが (14) 式のような拘束条件下にあるときの可操作性楕円体について考える。

前節の議論では、許容される関節速度ベクトル $\dot{\theta}$ の集合としては、 $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ を満たすものとした。本節の場合には、さらに (14) 式も満たす必要があるので、許容される関節速度ベクトルの集合 P_A は次のように定義される。

$$P_A = \{\dot{\theta} | B\dot{\theta} = 0\} \cap \{\dot{\theta} | \|\dot{\theta}\| \leq 1\} \\ = \text{Null}(B) \cap \{\dot{\theta} | \|\dot{\theta}\| \leq 1\} \quad (15)$$



(a) Arm Posture

ただし、 $\text{Null}(B)$ は B の零空間を意味する。

Fig. 1 のシステムの場合には $n=3, r=1$ なので、 $\text{Null}(B)$ や P_A は、Fig. 2 に示すように与えられる。

次に、(15) 式による P_A の定義を、より簡単な式で置き換えることにする。そのため、部分空間 $\text{Null}(B)$ について考える。 $\text{rank } B=r$ なので $\dim \text{Null}(B)=n-r$ である。 $\text{Null}(B)$ の正規直交基底を適当に選び h_1, h_2, \dots, h_{n-r} とする。このとき、 $\text{Null}(B)$ に含まれる任意の $\dot{\theta}$ は次のように表すことができる。

$$\dot{\theta} = h_1 z_1 + h_2 z_2 + \dots + h_{n-r} z_{n-r} = H z \quad (16)$$

ここで

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_{n-r}] \quad (17)$$

$$z = [z_1, z_2, \dots, z_{n-r}]^T \quad (18)$$

また、 h_1, h_2, \dots, h_{n-r} の正規直交性より次式が成り立つ。

$$\|\dot{\theta}\|^2 = (h_1 z_1 + \dots + h_{n-r} z_{n-r})^T \cdot (h_1 z_1 + \dots + h_{n-r} z_{n-r}) \\ = z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_{n-r}^2 \\ = \|z\|^2 \quad (19)$$

そこで、(15) 式で定義される P_A は次のようにも表すことができる。

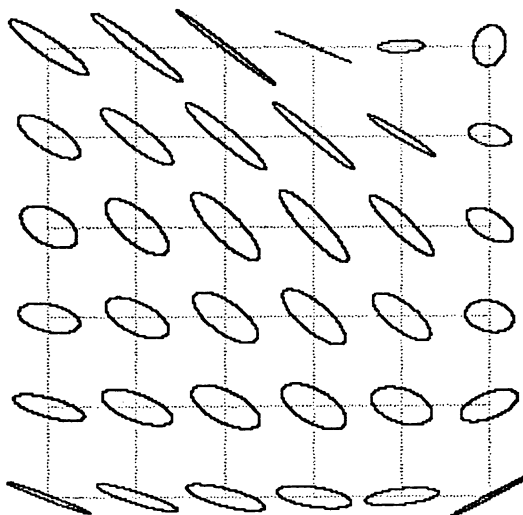
$$P_A = \{\dot{\theta} | \dot{\theta} = H z, \|z\| \leq 1\} \quad (20)$$

P_A に含まれる関節速度ベクトル $\dot{\theta}$ によって実現することができる手先効果器の速度ベクトル \dot{x} のすべてからなる集合は次のように表される。

$$S_A = \{\dot{x} | \dot{x} = J H z, \|z\| \leq 1\} \quad (21)$$

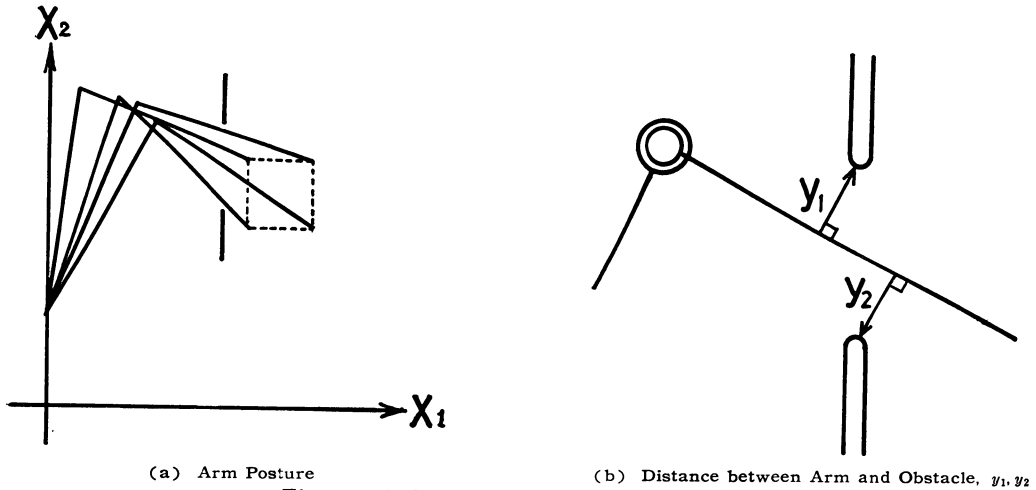
前節の議論、および (6) 式と (21) 式の比較から分かるように、 S_A は楕円体であり、その主軸は次のように与えられる。ただし、 $\text{rank } JH=m$ とする。

JH を次のように特異値分解する。



(b) Manipulability Ellipsoid, S_A

Fig. 3 3-link Manipulator Inserted through a Narrow Slit

Fig. 4 2-link Manipulator ($l_1=0.9$, $l_2=0.75$)

$$JH = PAQ^T \quad (22)$$

ここで,

$$A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \in R^{m \times (n-r)} \quad (23)$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$$

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_m] \quad (24)$$

であり, $P \in R^{m \times m}$, $Q \in R^{(n-r) \times (n-r)}$ は直交行列である. 前節の議論から分かるように, 楕円体 S_A の主軸は $\lambda_1 p_1, \lambda_2 p_2, \dots, \lambda_m p_m$ で与えられる.

本研究では, (14) 式で示す拘束条件下における可操作度 q_A を, この楕円体 S_A の体積に対応する量とし, $q_A = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m$ (25) と定義することにする.

例 1

Fig. 1 の 3 リンクマニピュレータを用いて, Fig. 3 (a) に示すような姿勢で作業をしたとき, 本節で定義した可操作性楕円体がどのようになるかを示す. ただし手先効果器のベクトル x は, 第 3 リンクの先端の x_1, x_2 座標からなるものとする.

Fig. 3(a) の破線の範囲内に第 3 リンクの先端があるときの, 可操作性楕円体の変化を Fig. 3(b) に示す. 図から分かるように, この程度の狭い範囲でも可操作性楕円体は複雑に変化している. すなわち, 拘束条件がない場合と異なり, この程度の簡単な問題でも直感的に可操作性を考えることが難しくなっている.

4. 障害物方向への速度が制限される場合の可操作性楕円体および可操作度

4.1 許容される関節速度の集合 P_B

マニピュレータと障害物の接近が q カ所 ($q \leq n$) で起きている場合を考える. 各場所における接近速度 \dot{y}_i をまとめて表すベクトルを $\dot{y} \in R_q$ とする. 本節では, この速度が次のように制限される場合を考える.

$$|\dot{y}_i| \leq v_{i\max} \quad i=1, 2, \dots, q \quad (26)$$

上式を満たす速度ベクトル \dot{y} の集合は, q 次元空間における直方体となる.

一例として, Fig. 4(a) に示すように, 障害物の隙間から 2 リンクのマニピュレータを差し込んで作業する場合を考える. このとき Fig. 4(b) から分かるようにマニピュレータは障害物と 2 カ所で接近を起こしている. この場合接近距離 y_1, y_2 は図のように定義され, 接近速度 \dot{y}_1, \dot{y}_2 はその時間変化として定義される.

(26) 式のように制限を与えた場合, 接近速度と遠ざかる速度の両方を拘束していることになる. 遠ざかる場合に関しては必ずしも拘束する必要はないが, 可操作性楕円体を計算する便宜を考え, また安全側の評価を得るためこのようにした.

さらに, (26) 式を近似することを考える. (26) 式のように \dot{y} の集合を考えると, 手先効果器の速度ベクトルの集合を求めるための計算が非常に複雑になり, また得られる集合も楕円体とはならない. そこで, (26) 式で定義される直方体に内接する楕円体によって \dot{y} の制限範囲を近似することにする. すなわち

$$\dot{y}^T W \dot{y} \leq 1 \quad (27)$$

ただし, W は $q \times q$ 正値対称行列である.

関節速度 $\dot{\theta}$ と \dot{y} の関係は次のように表されるものとする。

$$\dot{y} = F\dot{\theta}, F \in R^{q \times n} \quad (28)$$

ただし, $\text{rank } F = q$ とする。(28) 式を (27) 式に代入することにより次式が得られる。

$$\dot{\theta}^T F^T W F \dot{\theta} \leq 1 \quad (29)$$

許容される関節速度ベクトルの集合 P_B は, 関節が本来持っている速度限界 $\|\dot{\theta}\| \leq 1$, および上式を満たす $\dot{\theta}$ からなる。すなわち

$$P_B = \{\dot{\theta} | \dot{\theta}^T F^T W F \dot{\theta} \leq 1\} \cap \{\dot{\theta} | \|\dot{\theta}\| \leq 1\} \quad (30)$$

上式から分かるように, 集合 P_B は多くの場合楕円体とはならず, 複雑な形になる。

4.2 P_B に内接する楕円体 P_B' の誘導

次に, (30) 式で定義される許容関節速度ベクトルの集合 P_B を, より計算に便利な集合で近似することを考える。その集合として P_B に内接する楕円体 P_B' を採用することにする。本節では, この P_B' の誘導について述べる。

関節速度の空間 $\dot{\theta}$ は, 行列論のよく知られた性質から次のように分解することができる。

$$\dot{\theta} = \text{Null}(F) \oplus \text{Range}(F^T) \quad (31)$$

$$\text{Null}(F) \perp \text{Range}(F^T) \quad (32)$$

ただし, $\text{Null}(F)$ は F の零空間を意味し, $\text{Range}(F^T)$ は F^T の値域を意味する。また, \oplus は直和を意味する。

(31) 式から明らかなように, 任意の $\dot{\theta} \in \dot{\theta}$ は

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_N + \dot{\theta}_R \quad (33)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_N \in \text{Null}(F) \\ \dot{\theta}_R \in \text{Range}(F^T) \end{cases} \quad (34)$$

と, 一意に表すことができる。(29) 式に (33) 式を代入すると, $\dot{\theta}_N$ の項は消え次式が得られる。

$$\dot{\theta}_R^T F^T W F \dot{\theta}_R \leq 1 \quad (35)$$

すなわち, (29) 式は, $\dot{\theta}_R$ のみに制限を与えるものであり, $\dot{\theta}_N$ に対しては何の制限にもなっていないことが分かる。

そこで, $\text{Null}(F)$ と $\text{Range}(F^T)$ に分けて議論を行う。 $\dot{\theta}_R$ を含む空間である $\text{Range}(F^T)$ における議論を最初に行う。この空間上では, 関節速度の制限 $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ は $\|\dot{\theta}_R\| \leq 1$ と表される。(35) 式および $\|\dot{\theta}_R\| \leq 1$ を満たす $\text{Range}(F^T)$ における集合を Q_B とする。すなわち,

$$Q_B = \{\dot{\theta}_R | \dot{\theta}_R^T F^T W F \dot{\theta}_R \leq 1\} \cap \{\dot{\theta}_R | \|\dot{\theta}_R\| \leq 1\} \quad (36)$$

上式の右辺第 1 項の集合は, $\text{Range}(F^T)$ における楕円体であり, その主軸は次のようにして計算できる⁷⁾。

$F^T W F$ には q 個の正の固有値 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_q$ と $n-q$ 個の零固有値がある。正の固有値 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_q$ に対する固有ベクトルを正規化したものを e_1, e_2, \dots, e_q とする。このとき,

$$e_1, e_2, \dots, e_q \in \text{Range}(F^T)$$

である。また, $F^T W F$ は実対称行列なので e_1, e_2, \dots, e_q は互いに直交している。(35) 式を満たす楕円体の主軸は, $(1/\sqrt{\rho_1})e_1, (1/\sqrt{\rho_2})e_2, \dots, (1/\sqrt{\rho_q})e_q$ によって与えられる⁷⁾。

$\text{Range}(F^T)$ が 2 次元の場合の Q_B の例を Fig. 5(a) に示す。 Q_B は図中の斜線で示される領域である。この例から分かるように, Q_B の形は複雑なので, Fig. 5(b) に斜線で示すように内接する楕円体で近似することを考え, その集合に Q_B' という名前をつけた。Fig. 5(b) には 2 次元の例を示したが, このような楕円体 Q_B' は一般には次のように与えられる。すなわち, 楕円体 Q_B' の主軸は

$$\alpha_1 e_1, \alpha_2 e_2, \dots, \alpha_q e_q$$

で与えられる。ただし

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & (\sqrt{1/\rho_i} \geq 1 \text{ のとき}) \\ \sqrt{1/\rho_i}, & (\sqrt{1/\rho_i} < 1 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (37)$$

次に, 部分空間 $\text{Null}(F)$ において, $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ 及び (29) 式を満たす関節速度の集合を求める。しかし, (29) 式は, 前述のように $\text{Null}(F)$ の要素である $\dot{\theta}_N$ に対しては何の制限にもなっていない。そこで, $\|\dot{\theta}_N\| \leq 1$ のみ

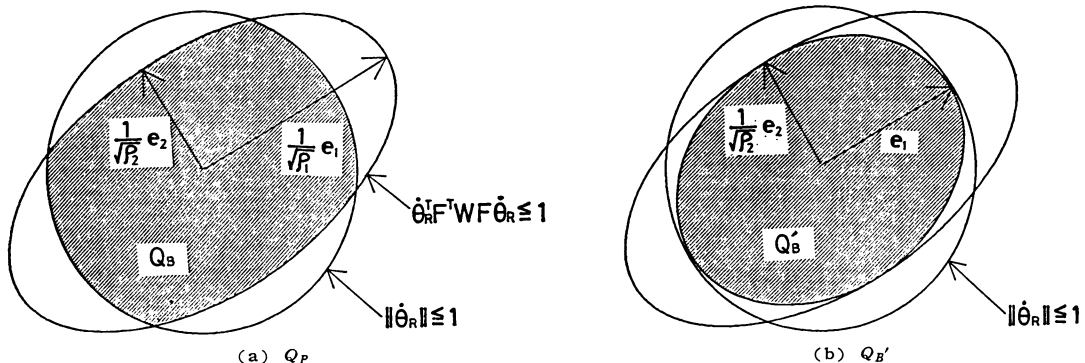


Fig. 5 Set of Admissible Joint Velocity Vectors in $\text{Range}(F^T)$

を満たす集合を求めればよい。すなわち、 $\text{Null}(F)$ における許容関節速度ベクトルの集合は、 $\text{Null}(F)$ の正規直交基底 d_1, d_2, \dots, d_{n-q} を主軸とする楕円体 R_B すなわち球として与えられる。

以上の議論では、 $\text{Range}(F^T)$ および $\text{Null}(F)$ における許容関節速度ベクトルの集合をそれぞれ楕円体 Q_B' および R_B として得た。 $\dot{\theta}$ における許容関節速度ベクトルの集合 P_B' としては、 Q_B' および R_B の主軸をその主軸とする楕円体を選ぶことにする。すなわち、 P_B' の主軸は、 $d_1, d_2, \dots, d_{n-q}, \alpha_1 e_1, \alpha_2 e_2, \dots, \alpha_q e_q$ よりなる。

また、楕円体 P_B' は、2 節の議論から分かるように、次のようにも表せる。

$$P_B' = \{\dot{\theta} | \dot{\theta} = G\Gamma\xi, \|\xi\| \leq 1\} \quad (38)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} G &= [d_1, \dots, d_{n-q}, e_1, \dots, e_q] \\ \Gamma &= \text{diag}(1, \dots, 1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q) \\ \xi &= (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

最後に、上記のようにして求めた P_B' が $P_B' \subseteq P_B$ を満たすかどうかを確認する。すなわち、 P_B' に含まれる任意の $\dot{\theta}$ が、 $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ および (29) 式を満たすことを示す。これらの式の左辺に $\dot{\theta} = G\Gamma\xi$ を代入すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \|\dot{\theta}\|^2 &= \xi^T \Gamma^T G^T G \Gamma \xi \\ &= \xi_1^2 + \dots + \xi_{n-q}^2 + \alpha_1^2 \xi_{n-q+1}^2 + \dots + \alpha_q^2 \xi_n^2 \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}^T F^T W F \dot{\theta} &= \xi^T \Gamma^T G^T F^T W F G \Gamma \xi \\ &= \alpha_1^2 \rho_1 \xi_{n-q+1}^2 + \dots + \alpha_q^2 \rho_q \xi_n^2 \end{aligned} \quad (41)$$

ゆえに、 $\|\xi\| \leq 1$ であれば、 $\|\dot{\theta}\| \leq 1$ および (29) 式が成り立つ。

4.3 可操作性楕円体 S_B

P_B' に含まれる関節速度ベクトル $\dot{\theta}$ によって実現することのできる手先効果器の速度ベクトル \dot{x} のすべての集合は次のようにして表される。

$$S_B = \{\dot{x} | \dot{x} = JG\Gamma\xi, \|\xi\| \leq 1\} \quad (42)$$

前節の議論と同様にして、行列 $JG\Gamma$ を特異値分解することにより、可操作性楕円体 S_B の主軸は決定できる。本研究では、(27) 式の拘束条件下にある可操作度 q_B を、この楕円体 S_B の体積に対応する量とし、

$$q_B = r_1 r_2 \dots r_m \quad (43)$$

と定義することにする。ただし、 $r_1 r_2 \dots r_m$ は行列 $JG\Gamma$ の特異値である。

例 2

Fig. 4(a) に示す障害物の隙間からマニピュレータを差し込んで作業する例について考え、本節で定義した可

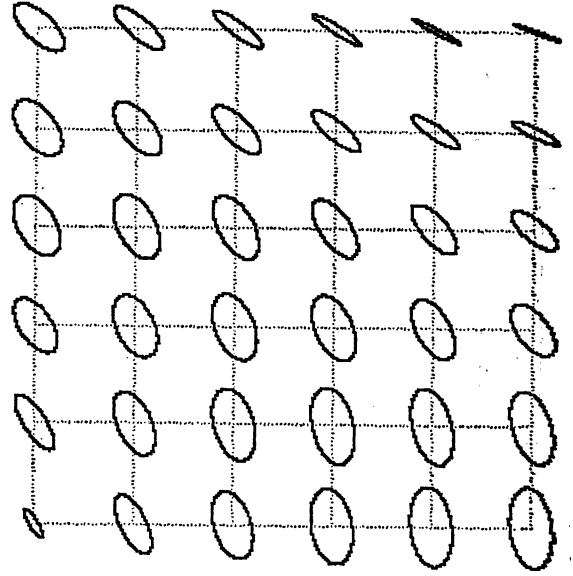


Fig. 6 Manipulability Ellipsoid, S_B

操作性楕円体を求めてみる。

接近速度に関する制限は、距離が近いほど厳しくし、次のように設定する。

$$\dot{y}_i \leq a_i^2 y_i^2 \quad i=1, 2 \quad (44)$$

このとき、(27) 式の W は

$$W = \begin{bmatrix} 1/a_1^2 y_1^2 & 0 \\ 0 & 1/a_2^2 y_2^2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

となる。

ここでは、Fig. 4(a) の破線の範囲内でマニピュレータの先端を動かすことを考える。この範囲内において本節で定義した可操作性楕円体 S_B を Fig. 6 に示す。ただし、 $a_1 = a_2 = 6$ とした。

5. 8 リンクマニピュレータによる障害物回避制御

3 節で定義した可操作度を考慮してマニピュレータの制御を行った例を示す。Fig. 7 に示すような関節構成を持つ 8 リンクマニピュレータを用いてシミュレーションおよび実験を行った。この実験では、Fig. 8 に示すように、細長いスリットの間にマニピュレータを差し込んで、把持したパイプを一定の方向に向けてながら直線に沿って移動させた。この実験では、マニピュレータがスリットの中央を通過する必要があるという拘束条件を設定した。この拘束条件を満たすため、手先効果器の位置、及び方向を表すベクトル x を以下のように拡張する。スリットの中央からのマニピュレータのずれを表す変数を x_7 とし、 x を拡張したベクトルを \bar{x} と定義する。すなわち、

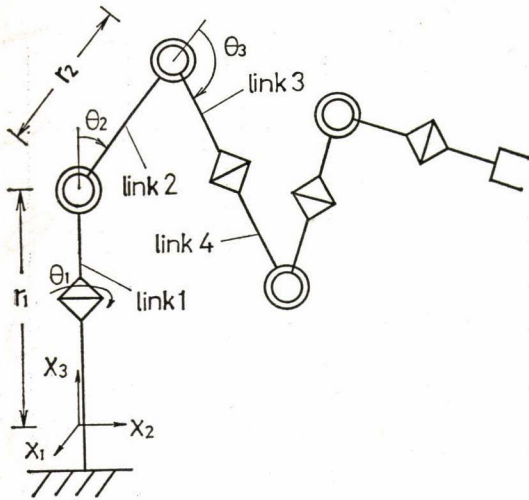


Fig. 7 8-link Manipulator

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}^T, x_7]^T \quad (46)$$

関節角度ベクトル θ と \mathbf{x} の関係を

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\theta) \quad (47)$$

と表す。このとき、次式が成り立つ。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \dot{\theta} \quad (48)$$

ここで $\mathbf{J} = \partial \mathbf{f}(\theta) / \partial \theta \in R^{7 \times 8}$ である。

\mathbf{J} は 7×8 行列なので、 $\dot{\mathbf{x}}$ が与えられたとき、 $\dot{\theta}$ を一意に決定することはできない。この冗長性を有効に利用して、3節で定義した可操作度 q_A を大きな値に保持しながら軌道を制御することを考える。その方法として、次に述べる Liegeois¹¹⁾, Yoshikawa²⁾ による方法を用いる。

(48) 式に関する $\dot{\theta}$ の一般解は次のように表される。

$$\dot{\theta} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \mathbf{k} \quad (49)$$

ただし、 \mathbf{J}^+ は \mathbf{J} の擬似逆行列であり、 \mathbf{k} は任意の8次ベクトルである。この \mathbf{k} の任意性を利用して、3節で定義した可操作度 q_A を大きな値に保持することを考える。

そのため、 \mathbf{k} を次のように選ぶ。

$$\mathbf{k} = \{\partial q_A(\theta) / \partial \theta\}^T \mathbf{k}_p = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{k}_p \quad (50)$$

ここで、 $\boldsymbol{\zeta} = \{\partial q_A(\theta) / \partial \theta\}^T$ とする。

ただし、 \mathbf{k}_p は適当な正の数に選ぶことのできる調節パラメータである。このように \mathbf{k} を選ぶと、 \dot{q}_A は次のように表される。

$$\dot{q}_A = \boldsymbol{\zeta}^T \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\zeta}^T (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \boldsymbol{\zeta} \mathbf{k}_p$$

$(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J})$ は非負定行列であるので、上式の右辺第2項は常に非負である。すなわち、(50) 式のように \mathbf{k} を選ぶと、上式の右辺第2項は、評価 q_A を大きくする方向に常に作用する^{2,9)}。

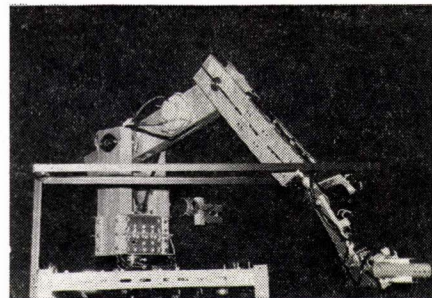
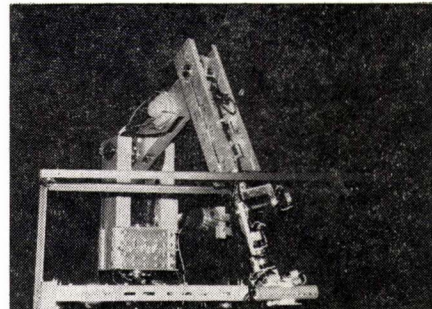
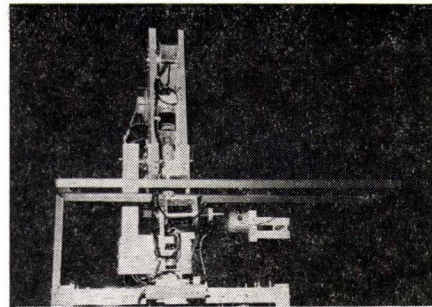


Fig. 8 Experimental Results

関節速度 $\dot{\theta}$ に対する拘束条件式 (14) の行列 \mathbf{B} を具体的に以下で求めておく。スリットの中央の座標は $x_1 = x_{1s}, x_3 = x_{3s}$ で与えられるものとする。また、第3リンクおよび第4リンクの中心軸がこのスリットの中央を通るという問題設定とする。

本マニピュレータでは第1、第2リンクの中心軸は、それらのリンク間の回転軸と同一の点で交わっている。また第2リンク、第3リンクについてもこの性質が成り立っているので、行列 \mathbf{B} の形は比較的簡単になり次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{B} = & [s_1 s_3 r_2 - s_1 s_{23} (x_{3s} - r_1), \\ & s_{23} x_{1s} + c_1 c_{23} (x_{3s} - r_1), \\ & s_{23} x_{1s} + c_1 c_{23} (x_{3s} - r_1) - c_1 c_3 r_2, \\ & 0, 0, 0, 0, 0] \end{aligned}$$

ここで、 r_1, r_2 は Fig. 7 に定義するものである。また、 $c_1 = \cos(\theta_1)$, $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$, $s_3 = \sin(\theta_3)$, $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ とする。

Fig. 8 に示したマニピュレータの動きは $k_p=10$ とした場合である。このときの真上からみたアームの動きをスティック線図で表したのが、Fig. 9(a) である。また Fig. 9(b) には、ハンドの x_2 座標を横軸としたときの可操作度 q_A の変化を示す。図から分かるように、 q_A は急激に大きくなり、その後それほど小さくなっていない。

Fig. 10 には、 $k_p=0$ とした時のスティック線図および可操作度 q_A の変化を示す。図から分かるように、 q_A は大きな値に保持されることがなく、最後には操作性が著しく悪化している。

6. お わ り に

マニピュレータの運動学的な操作性能を表す指標として従来から提案されている可操作度の概念を、障害物のある環境下で動作するマニピュレータに拡張した。障害物に起因する制限条件としては2つの場合を考え、それぞれ3節および4節で論じた。

3節では、障害物ゆえに関節速度ベクトル $\dot{\theta}$ が等式拘束を受ける場合を考えた。この場合のマニピュレータの

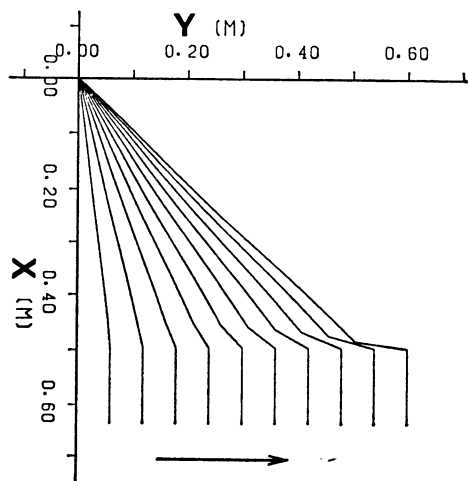
運動学的な操作性能を表す指標として、(21) 式で定義される可操作性楕円体 S_A 、及び (25) 式で定義される可操作度 q_A を導いた。

4節では、障害物方向への速度が (27) 式のように不等式拘束条件で、制限される場合を考えた。この場合には、許容関節速度ベクトルの集合 P_B は一般には楕円体とはならないので、 P_B に内接する楕円体 P_B' で許容関節速度ベクトルの集合を近似した。このように近似することにより (42) 式で定義される可操作性楕円体 S_B 、および (43) 式で定義される可操作度 q_B を導いた。

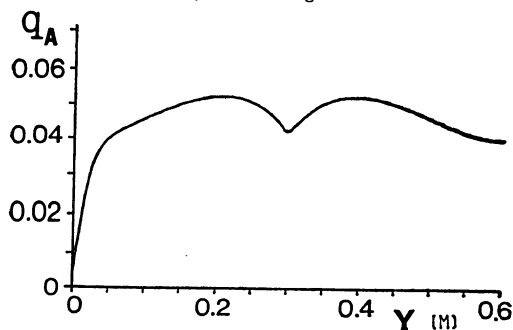
今後マニピュレータは種々の環境下で使われるようになり、障害物に対する配慮も益々必要になると考えられる。しかし、障害物の影響を考慮してマニピュレータの操作性能を評価する際には、それを直感的に知ることは非常に難しく、定量的に表現することが必要となる。このような際に、本研究で与えた可操作性楕円体や可操作度は一つの良い目安になると考えている。

謝 辞

本研究の遂行に多大なる協力をして頂いた大西悟氏 (現在、名古屋市交通局勤務) に深甚なる謝意を表します。

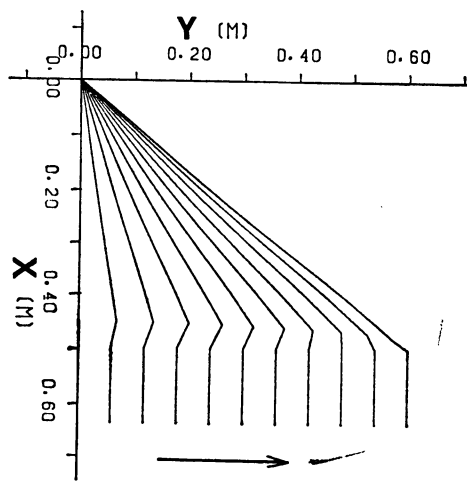


(a) Stick Diagram

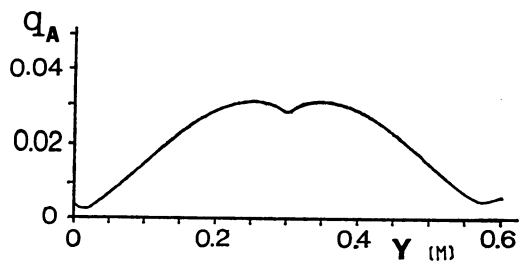


(b) Measure of Manipulability, q_A

Fig.9 Variation of Manipulability ($k_p=10$)



(a) Stick Diagram



(b) Measure of Manipulability, q_A

Fig.10 Variation of Manipulability ($k_p=0$)

参 考 文 献

- 1) 吉川, “ロボットアームの可操作度”, 日本ロボット学会誌, 2-1, pp. 63-67, 1984.
- 2) T. Yoshikawa, “Analysis and Control of Manipulators with Redundancy”, Proc. of the 1st International Robotics research, pp. 735-747, 1983.
- 3) 内山, 清水, 箱守, “ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価”, 計測自動制御学会論文集, 21-2, pp. 190-196, 1985.
- 4) J. K. Salisbury and J. J. Craig, “Articulated hands: Force Control and Kinematic” Issues, Int. J. of Robotics Research, 1-1, pp. 4-17, 1982.
- 5) 花房, 吉川, 中村, “関節形ロボットアームの冗長性解析とその優先順位を有する作業への応用”, 計測自動制御学会論文集, 19-5, pp. 421-426, 1983.
- 6) 伊理, 児玉, 須田, “特異値分解とそのシステム制御への応用”, 計測と制御, 21-8, pp. 763-772, 1982.
- 7) 柴岡, “線形空間”, pp. 231-241, 裳華房, 1971.
- 8) 児玉, 須田, “システム制御のためのマトリクス理論”, pp. 155, 計測自動制御学会, 1978.
- 9) 吉川, “冗長性を有するロボットの制御”, 日本ロボット学会誌, 2-6, pp. 587-592, 1984.
- 10) 尾崎, “マニピュレータの障害物回避”, 日本ロボット学会誌, 2-6, pp. 580-586, 1984.
- 11) A. Liegeois, “Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanism”, IEEE Trans. Vol. SMC-7, No. 12, pp. 868-871, 1977.



古荘純次 (Junji HURUSHO)

昭和22年3月22日生まれ。45年大阪大学工学部産業機械工学科卒業。50年同大学博士課程修了, 工学博士。大阪大学工学部産業機械工学科助手を経て, 現在, 岐阜大学工学部機械工学科助教授。この間, ロボット工学, プロセス制御, 多変数制御系の設計等の研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会, パイオメカニズム学会等の会員 (日本ロボット学会正会員)



白井広幸 (Hiroyuki USUI)

昭和38年1月15日生まれ。61年岐阜大学工学部機械工学科卒業。現在, 同大学大学院工学研究科修士課程在学中 (日本ロボット学会学生会員)



佐野明人 (Akihito SANO)

昭和38年2月8日生まれ。62年3月岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月岐阜大学工学部機械工学科助手。現在に至る。ロボット工学の研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会の会員 (日本ロボット学会正会員)

Manipulability of Robotic Manipulators Considering the Influence of Obstacles*

Junji FURUSHO** Hiroyuki USUI** Akihito SANO**

ABSTRACT

It is useful for control of robot manipulators and for task planning if we have a quantitative measure of manipulating ability in positioning and orienting the endeffectors. In this paper, a method for estimating the ability of robot manipulators under the environment with obstacles is proposed from the viewpoint of kinematics.

The obstacles which are close to a manipulator bring some restrictions to the motion of the manipulator. In this paper, we discuss two cases; the one is the case that the joint velocity vector must satisfy the equality constraint for the purpose of avoiding the obstacle, and the other is the case that the approaching speed to the obstacle is restricted. For each case, we derive a manipulability ellipsoid and a measure of manipulability. Lastly, as an example, an experiment and simulation results using an eight degree of freedom manipulator are shown. In this experiment, the endeffector is inserted into an inside space through a narrow slit, and the joint angle velocities are controlled so as to keep the proposed manipulability large.

Key Words: Robot Arm, Kinematic Evaluation, Manipulability, Obstacle Avoidance, Task Planning

* Received September 16, 1987

** Faculty of Engineering, Gifu University