マニピュレータの駆動特性評価法*

立 矢 宏^{*1}, 竹 内 政 紀^{*2}
西 山 貴 之^{*3}, 谷 信 明^{*3}

Method for Evaluating the Actuatibility of Manipulators

Hiroshi TACHIYA^{*4}, Masaki TAKEUCHI,
Takayuki NISHIYAMA and Sadaaki TANI^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University,
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667 Japan

This paper presents a new method for evaluating an input/output characteristic of a manipulator. The proposed method can clarify a required torque and velocity for a manipulator outputting isotropic force and velocity, translational and rotational components of which are evaluated independently. This study calls such a characteristic as actuatibility. Actuatibility can be easily evaluated by solving the eigenvalue problem of Jacobian which reveals the infinitesimal input/output relation of a manipulator. The evaluation of actuatibility will reveal an appropriate configuration of a manipulator, required specifications of actuators and so on, thereby bringing the improvement of various performances of a manipulator. This paper has especially clarified the actuatibility of an in-parallel actuated manipulator and compared the proposed method with the evaluation of manipulability which is a representative method evaluating of an input/output characteristic of a manipulator. As a result, it has been confirmed that the proposed method will be more practical for determining the configuration, selecting the actuators of a manipulator and so on.

Key Words: Manipulator, Robot, Design, Actuatibility, Isotropic Output, Manipulability, In-Parallel Actuated Manipulator

1. 緒 言

マニピュレータの入出力関係を評価し,適切な姿勢,すなわち,位置と姿勢を決定して,入力部に連結するアクチュエータ,減速機などを選定することは,マニピュレータの作業能力の向上のみならず,製作コストなどを抑えるために重要である.しかし,マニピュレータの入出力関係は,その姿勢に対して複雑に変化する⁽¹⁾.また,近年注目されている多自由度な運動が可能な平行マニピュレータでは,複数の方向に対し並進および回転運動を行うため,複雑に変化するこれらの入出力関係をすべて把握することは容易でない.

マニピュレータの入出力関係の評価法としては,可操作性⁽²⁾に基づく方法⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾がよく用いられる.しかし,可操作性の概念に基づく評価法は,マニピュレータへの入力量の総和を一定とするため,各入力部に要する入力値の評価が個々に行えない.また,得られる評価値も,マニピュレータを駆動するための物理量を明示しない⁽⁵⁾ことから,マニピュレータの設計やアクチュエータの選定には必ずしも適していない⁽⁶⁾.これに対して著者等は先に,マニピュレータの代表的な開ループおよび閉ループ機構について,作業領域全体にわたる入出力関係の変化が把握可能な,特性図による評価方法を示した⁽⁷⁾.しかし,

同方法は,自由度が少なく,さらに,運動方向があらかじめ与えられているマニピュレータの評価には有用であるが,そうでない場合の評価には適さない.

作業時に様々な方向への運動が要求されるマニピュレータ,歩行ロボットなどにおいては,発生し得る力および速度が,全運動方向に対して等方的であることが望ましい⁽⁶⁾⁽⁸⁾.そこで,武田等は,マニピュレータが発生し得る並進および回転に関する出力を同時に考慮可能な,等方的な出力特性の評価法を確立している⁽⁸⁾.同評価法は,形式の異なる機構,また,並進および回転運動を同時に行う高速なマニピュレータに用いる機構を比較するために有用である.しかし,機構形式,寸法などがおおよそ決定され,用途が定められているマニピュレータに対しては,並進および回転運動に関する入出力関係を,それぞれ独立に明らかにし⁽⁴⁾⁽⁵⁾,具体的な物理量に関連した値として求めることが望ましい⁽⁵⁾.すなわち,マニピュレータが,平面または空間内の任意方向へ並進および回転運動を行う場合に必要となる入力および入力速度の最大値がそれぞれ容易に把握可能となれば,マニピュレータの姿勢の決定や,駆動系の選定が容易となり,マニピュレータの設計全般に有用である.

そこで,本論文ではマニピュレータが運動可能な任意方向に対し,等方的に力および速度を発生するために必要となる入力および入力速度に関する特性を駆動特性

* 原稿受付 2001 年 3 月 14 日.

^{*1} 正員, 金沢大学工学部(〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20).^{*2} NTN(株)磐田製作所(〒438-8510 磐田市東貝塚 1578).^{*3} 金沢大学大学院.

E-mail: tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

Fig.1 Manipulator outputting isotropic force

と呼び、これらの特性を、並進および回転出力に関して、それぞれ独立して把握する評価方法について述べる。また、駆動特性の評価結果によって、適切なマニピュレータの姿容の決定や、必要な入力・入力速度の具体的な物理量が容易に把握可能となることを、特にパラレルマニピュレータを対象として示す。

2. 駆動特性の評価法

2.1 駆動力の評価 図1のように、マニピュレータが運動可能な空間内(または平面内)の任意方向へ等方的な並進または回転力を発生する場合に必要な入力について検討する。なお、本論文では冗長な自由度を有さないマニピュレータを対象とする。また、以下においては、並進力および回転力をあわせて力と表現する。

まず、マニピュレータが発生する力について検討する。 n 自由度であるマニピュレータが発生する並進力 F 、回転力 M および入力 T を次式で表す。

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_m)^T \quad (1)$$

$$M = (M_1, M_2, \dots, M_{n-m})^T \quad (2)$$

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T \quad (3)$$

F_i および M_i は、独立した i 番目の方向への並進力および回転力を、 T_i は i 番目の入力部に要する力を表し、上付添字“ T ”は転置を示す。さらに、マニピュレータが発生する並進力および回転力をあわせて次式で表す。

$$F_{FM} = (F, M)^T \quad (4)$$

力 F_{FM} と入力 T との関係は次式で表される⁽⁹⁾。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1n} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ J_{n1} & J_{n2} & \cdots & J_{nn} \end{pmatrix} F_{FM} \quad (5)$$

上式において要素 J_{ij} を成分とする行列はマニピュレータの微分関係を表すヤコビ行列 J を示す。式(5)は並進および回転力を含む関係式であるが、本論文では緒言でも述べたように、並進および回転力に対する入力量

をそれぞれ独立して検討する。まず、並進力のみを対象とするために、ベクトル F_{FM} における $(M_1, M_2, \dots, M_{n-m})$ および式(5)の右辺において回転力 M_i に乗じられる行列 J^T の $(m+1)$ 列目以降を取り除く。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1m} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ J_{n1} & J_{n2} & \cdots & J_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{pmatrix} \quad (6)$$

上式はマニピュレータの発生する回転力が零で、並進力のみを発生する場合に必要な入力 T を表す。 J^T を縮小した式(6)中の行列を J_F と表し、さらに、 T_i に関連する行列 J_F の i 行目の要素を抜き出した行ベクトルを J_{Fi} とすれば次式が導かれる。

$$T_i = J_{Fi} F \quad (7)$$

上式はマニピュレータが発生する並進力に対して、 i 番目の入力部に要する力を表し、その値は J_{Fi} の変数であるマニピュレータの形状、発生する力の大きさや方向により変化する。同式の両辺を二乗すれば次式となる。

$$T_i^2 = F^T J_{Fi}^T J_{Fi} F \quad (8)$$

ここで $J_{Fi}^T J_{Fi}$ は実対称行列となる。 $J_{Fi}^T J_{Fi}$ の固有値を λ_{Fi} ($i=1 \sim m$)、対応する固有ベクトルを X_{Fi} ($i=1 \sim m$) とし、 X_{Fi} を列の成分とする行列 P_{Fi} を次式で定義する。

$$P_{Fi} = (X_{F1}, X_{F2}, \dots, X_{Fm}) \quad (9)$$

行列 $J_{Fi}^T J_{Fi}$ は、直交行列となる P_{Fi} によって、次式のように分解、対角化される⁽¹⁰⁾。

$$J_{Fi}^T J_{Fi} = P_{Fi}^T \Lambda P_{Fi} \quad (10)$$

Λ は $(\lambda_{F1}, \lambda_{F2}, \dots, \lambda_{Fm})$ を対角要素とする対角行列である。以上の関係を用いれば、式(8)は次式となる。

$$T_i^2 = (P_{Fi} F)^T \Lambda P_{Fi} F \quad (11)$$

ベクトル $P_{Fi} F$ を $\hat{F}$ で表し、その要素を $(\hat{F}_1, \hat{F}_2, \dots, \hat{F}_m)$ とすれば、式(11)は次式となる。

$$T_i^2 = \lambda_{F1} \hat{F}_1^2 + \lambda_{F2} \hat{F}_2^2 + \cdots + \lambda_{Fm} \hat{F}_m^2 \quad (12)$$

上式は、マニピュレータが発生する各方向への並進力の大きさに対して、 i 番目の入力部に必要となる力の値を表す。ここで、マニピュレータが任意の方向に対して等方的に発生可能な並進力の大きさを $\bar{f}$ とする。すなわち

$$F_1^2 + F_2^2 + \cdots + F_m^2 = \bar{f}^2 \quad (13)$$

さらに、式(11)において $P_{Fi} F$ は F に対して大きさを変えない直交座標変換であることから次式が成り立つ。

$$\hat{F}_1^2 + \hat{F}_2^2 + \cdots + \hat{F}_m^2 = \bar{f}^2 \quad (14)$$

また、式(8)における $J_{Fi} J_{Fi}^T$ は準正定値行列であり⁽¹⁰⁾、そ

の固有値は零以上となる。したがって、マニピュレータが等方的に大きさ $\bar{f}$ である並進力を発生するために、 i 番目の入力部に必要な力の最大値 T_{Fi} は次式で表される。

$$T_{Fi} = \max.(\sqrt{\lambda_{F1}}, \sqrt{\lambda_{F2}}, \dots, \sqrt{\lambda_{Fm}}) \times \bar{f} \quad (15)$$

以上の関係式を用いれば、マニピュレータがある姿勢において、運動可能な方向に等方的な並進力を発生するために必要な、各入力部での力の大きさが求められる。

マニピュレータが発生する等方的な回転力に対して、同様に以下の関係式が導かれる。すなわち、式(5)においてベクトル $\mathbf{F}_{FM}$ の要素である $(F_1, F_2, \dots, F_m)$ および並進力 F_i に乗じられる行列 $\mathbf{J}^T$ の 1 から m 列目までを省略した行列を $\mathbf{J}_M$ とすれば次式が成り立つ。

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}_M \mathbf{M} \quad (16)$$

上式は並進力が零であり、回転力のみを発生する場合の入力を表す。マニピュレータが発生する回転力に対して i 番目の入力部に要する力 T_i は、行列 $\mathbf{J}_M$ の i 行目の要素を抜き出した行ベクトル $\mathbf{J}_{Mi}$ より次式で表される。

$$T_i = \mathbf{J}_{Mi} \mathbf{M} \quad (17)$$

先と同じく、上式の両辺を二乗した場合に実対称行列となる $\mathbf{J}_{Mi}^T \mathbf{J}_{Mi}$ について、その固有値 λ_{Mi} ($i=1 \sim n-m$) に対応する固有ベクトル $\mathbf{X}_{Mi}$ ($i=1 \sim n-m$) を列の成分とする行列を $\mathbf{P}_{Mi}$ とする。ベクトル $\mathbf{P}_{Mi} \mathbf{M}$ を $\hat{\mathbf{M}}$ で表し、その要素を $(\hat{M}_1, \hat{M}_2, \dots, \hat{M}_{n-m})$ とすれば次式が導かれる。

$$T_i^2 = \lambda_{M1} \hat{M}_1^2 + \lambda_{M2} \hat{M}_2^2 + \dots + \lambda_{Mn-m} \hat{M}_{n-m}^2 \quad (18)$$

ここで、マニピュレータが運動可能な方向に発生する等方的な回転力の大きさを $\bar{m}$ とすれば、 $\mathbf{P}_{Mi} \mathbf{M}$ が $\mathbf{M}$ に対する直交座標変換であることから、式(14)と同じく次式が成り立つ。

$$\hat{M}_1^2 + \hat{M}_2^2 + \dots + \hat{M}_{n-m}^2 = \bar{m}^2 \quad (19)$$

したがって、並進力の場合と同じく、式(18)および(19)より、任意の姿勢においてマニピュレータが等方的に大きさ $\bar{m}$ である回転力を発生するために、 i 番目の入力部に必要な力の最大値 T_{Mi} が次式より得られる。

$$T_{Mi} = \max.(\sqrt{\lambda_{M1}}, \sqrt{\lambda_{M2}}, \dots, \sqrt{\lambda_{Mn-m}}) \times \bar{m} \quad (20)$$

本論文では、式(15)および(20)より得られる、マニピュレータが運動可能な任意方向に等しい並進または回転力を発生するために必要となる、各入力部の力の最大値を以後、駆動力と呼ぶ。

2.2 駆動速度の評価 前節と同様に、冗長性のない n 自由度のマニピュレータが運動可能な平面または空間内の任意方向へ等方的に並進または回転速度を発生する場合に必要な入力速度について検討する。なお、以下では、並進および回転速度をあわせて速度と表現する。

マニピュレータが発生する並進速度 $\mathbf{V}$ 、回転速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 、各入力部に要する速度 $\boldsymbol{\omega}$ を次式で定義する。

$$\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_m)^T \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{n-m})^T \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \quad (23)$$

V_i および Ω_i は、独立した i 番目の方向への並進および角速度を、 ω_i は i 番目の入力部に要する速度を表す。さらに、マニピュレータが発生する並進速度、角速度をあわせて次式で定義する。

$$\mathbf{V}_{v\Omega} = (\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega})^T \quad (24)$$

マニピュレータの出力速度 $\mathbf{V}_{v\Omega}$ と入力速度 $\boldsymbol{\omega}$ との関係は、ヤコビ行列 $\mathbf{J}$ を用いて次式で表される⁽¹¹⁾。

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{V}_{v\Omega} \quad (25)$$

前節と同じく、並進および回転速度それぞれに対して入力部に必要となる速度を明らかにする。まず、式(25)中の $\mathbf{J}^{-1}$ において、ベクトル $\mathbf{V}_{v\Omega}$ に含まれる $\boldsymbol{\Omega}$ の要素に乘じられることになる行列 $\mathbf{J}^{-1}$ の $m+1$ 列目以降を省略した行列を $\mathbf{J}_v$ とすれば、次式が導かれる。

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J}_v \mathbf{V} \quad (26)$$

上式はマニピュレータの出力角速度が零であり、並進速度のみを発生する場合の入力速度を表す。さらに、 ω_i に関連する行列 $\mathbf{J}_v$ の i 行目の要素を抜き出した行ベクトルを $\mathbf{J}_{vi}$ とすれば、出力並進速度に対して i 番目の入力部に要する速度 ω_i が次式で表される。

$$\omega_i = \mathbf{J}_{vi} \mathbf{V} \quad (27)$$

上式の両辺を二乗する。すなわち

$$\omega_i^2 = \mathbf{V}^T \mathbf{J}_{vi}^T \mathbf{J}_{vi} \mathbf{V} \quad (28)$$

先と同じく $\mathbf{J}_{vi}^T \mathbf{J}_{vi}$ が実対称行列であることに注目して、その固有値を λ_{vi} ($i=1 \sim m$) とし、対応する固有ベクトルからなるマトリックス $\mathbf{P}_{vi}$ を式(9)と同じく設定して、ベクトル $\mathbf{P}_{vi} \mathbf{V}$ を $\hat{\mathbf{V}}$ で表し、その要素を $(\hat{V}_1, \hat{V}_2, \dots, \hat{V}_m)$ とすれば、前節と同じ過程によって ω_i^2 は次式で表される。

$$\omega_i^2 = \lambda_{v1} \hat{V}_1^2 + \lambda_{v2} \hat{V}_2^2 + \dots + \lambda_{vm} \hat{V}_m^2 \quad (29)$$

マニピュレータが大きさ $\bar{v}$ である並進速度を等方的に発生可能な場合、 $\mathbf{P}_{vi} \mathbf{V}$ は $\mathbf{V}$ に対して大きさを変えない直交座標変換であることから、前節と同様に次式が成り立つ。

$$\hat{V}_1^2 + \hat{V}_2^2 + \dots + \hat{V}_m^2 = \bar{v}^2 \quad (30)$$

したがって、マニピュレータが運動可能な任意方向に並進速度 $\bar{v}$ を発生するために、 i 番目の入力部に必要となる最大速度 ω_{vi} は、 $\mathbf{J}_{vi}^T \mathbf{J}_{vi}$ の固有値 λ_{vi} ($i=1 \sim m$) より次

式で表される.

$$\omega_{vi} = \max.(\sqrt{\lambda_{v1}}, \sqrt{\lambda_{v2}}, \dots, \sqrt{\lambda_{vm}}) \times \bar{v} \dots\dots\dots (31)$$

また, マニピュレータが運動可能な任意の方向へ回転速度 $\bar{\omega}$ を発生するために i 番目の入力部に必要となる最大速度 $\omega_{\Omega i}$ も, これまでと同じく以下のようにして得られる. すなわち, 式(25)の J^1 においてベクトル $V_{v\Omega}$ に含まれ V の要素に乗じられる行列 J^1 の1から m 列目までを省略した行列を J_{Ω} とする. ω_i に関連する行列 J_{Ω} の i 行目の要素を抜き出した行ベクトルを $J_{\Omega i}$ とすれば, これまでと同様な過程によって, $\omega_{\Omega i}$ は実対称行列 $J_{\Omega i}^T J_{\Omega i}$ の固有値 $\lambda_{\Omega i}$ ($i=1 \sim n-m$)より次式で得られる.

$$\omega_{\Omega i} = \max.(\sqrt{\lambda_{\Omega 1}}, \sqrt{\lambda_{\Omega 2}}, \dots, \sqrt{\lambda_{\Omega n-m}}) \times \bar{\omega} \dots\dots\dots (32)$$

本論文では, 式(31)および(32)より得られる, マニピュレータが運動可能な任意方向に等しい並進または回転速度を発生するために必要となる, 各入力部の速度の最大値を以後, 駆動速度と呼ぶ.

3. 駆動特性の評価例

3.1 平面平行マニピュレータの駆動特性の評価

以上で提案した駆動特性の評価例を, 並進および回転運動が発生可能な, 図2に示す3自由度平面平行マニピュレータを対象として示す. 同マニピュレータは, 静止節と出力節を連結する3つの連鎖が, それぞれ図2に示すXY座標を含む平面に垂直な軸周りに回転する3つの1自由度回転対偶で構成されている. 各連鎖の構造は同一であり, 静止節と連鎖を連結する対偶 J_{1i} および出力節と連鎖を連結する対偶 $J_{i,3}$ ($i=1 \sim 3$)は, それぞれ半径 R_{IN} および R_{OUT} である円周上に等間隔に配置されている. 同マニピュレータはXY平面内において任意方向への並進力および並進速度を, また, XY平面に垂直な軸周りの回転力および回転速度を発生する. なお, 本論文では同マニピュレータの出力節の位置を, 出力

節上の対偶 $J_{1,3}$ を結ぶ円の中心点Pの位置で表す. また, 図2のように静止節上および出力節上に座標系O-XYおよび $P-x_p y_p$ をそれぞれ設定し, O-XYに対する $P-x_p y_p$ の傾き角 γ で出力節の姿勢を表す. なお, 静止節上の対偶点 $J_{2,3}$ および $J_{3,3}$ を結ぶ線分がX軸と平行となるとき γ を零とする.

平面平行マニピュレータが出力可能なX,Y軸方向の並進およびZ軸周りの回転力を, F_x , F_y および M_z とすれば, 図中の回転対偶 $J_{i,1}$ ($i=1 \sim 3$)に連結される入力軸に要する各トルク T_i ($i=1 \sim 3$)は, ヤコビ行列を用いて次式で表される.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (33)$$

上式中の J_{ij} は, 図2の平面平行マニピュレータに関するヤコビ行列の i 行 j 列目の要素を示す. 図1のように, ある位置・姿勢においてマニピュレータが, 平面内の任意方向へ大きさ $\bar{f}$ の並進力を発生するために必要な入力トルクを2.1の方法で求める. すなわち, 式(33)におけるヤコビ行列中の並進力に関する要素に注目すれば, 式(8)に相当する次式が導かれる.

$$T_i^2 = [F_x \quad F_y] \begin{bmatrix} J_{1i} \cdot J_{1i} & J_{1i} \cdot J_{2i} \\ J_{2i} \cdot J_{1i} & J_{2i} \cdot J_{2i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (34)$$

上式の右辺に含まれる正方行列について固有値の平方根を求めれば, 式(12)のようにトルク T_i と並進力との関係式が導かれる. さらに, 式(15)より大きさ $\bar{f}$ の等方的な並進力に対して各トルク T_i の取りうる最大値, すなわち駆動力が得られる.

以上のようにして得られる評価結果に関して, シリアルマニピュレータなどを対象とする場合は, 個々の入力部の駆動力, 駆動速度を検討することにより, それぞれの入力部に応じたアクチュエータ, 減速機を選定すればよい. しかし, 平行マニピュレータの機構を構成する各連鎖は, 通常, 構造が互いに等しく, 入力部に連結されるアクチュエータ, 減速機も同一である場合が多い. したがって, 平行マニピュレータの姿勢の決定や, 用いるアクチュエータ, 減速機などの選定に関しては, 各入力部の駆動力および駆動速度全体の最大値を知ることが望ましい. そこで本論文では, 平行マニピュレータの各入力部に要する駆動力を比較して, その最大値を最大駆動力として定義する.

例として, 図2および表1に諸元を示す平面平行マニピュレータの出力節の位置を, 作業領域内で原点からX軸およびY軸方向にそれぞれ5mmずつ変化させ,

Fig.2 Planar in-parallel actuated manipulator

Table1 Dimensions of the manipulator (mm)

R_{IN}	R_{OUT}	l_1	l_2
820	500	650	750

(a) Maximum input torque to the unit output force

(b) Maximum input velocity to the unit output velocity

Fig.3 Actuability on translational outputs of the planar in-parallel actuated mechanism ($\gamma = 0^\circ$)

各位置において等方的な単位力を発生するために必要な最大駆動力 $T_{M,P}$ を求めた。得られた結果を出力節上の点Pの座標にプロットし等高線図として図3(a)に示す。なお、作業領域は、平面平行マニピュレータの出力節上の点Pが到達可能な範囲とし、出力節の姿勢を表す回転角 γ は常に零とした。また、図3の等高線図上の座標は、実際の作業領域上の座標を、図2に示す周上に入力軸が存在する円の半径 R_{IN} で除したものである。

次に、平面平行マニピュレータが発生する等方的な並進速度に対して、2.2で述べた方法により各入力軸の駆動速度を求める。駆動力の場合と同じく各入力軸の駆動速度を比較し、最も大きな値を最大駆動速度 $\omega_{M,P}$ とする。図2および表1に示す平面平行マニピュレータにおいて回転角 γ を常に零とし、出力節が等方的に単位速度を発生するための最大駆動速度 $\omega_{M,P}$ の変化を、先と同じく出力節の位置に対して求め、図3(b)に等高線図として示す。さらに、同マニピュレータが平面内で発生可能な回転出力に関する最大駆動力 $T_{M,R}$ および最大駆動速度 $\omega_{M,R}$ を図3の場合と同一条件で求め、図4(a)および(b)に示す。

図3, 4より、平面平行マニピュレータの駆動力、駆動速度に関する特性は、出力節の位置によって複雑に変化する。したがって、評価結果をもとに、最大駆動力、または最大駆動速度が適切な値となるような作業

(a) Maximum input torque to the unit output force

(b) Maximum input velocity to the unit output velocity

Fig.4 Actuability on rotational outputs of the planar in-parallel actuated mechanism ($\gamma = 0^\circ$)

時の出力点の移動領域(以後、作業範囲と呼ぶ)を選択すれば、アクチュエータへの負荷を軽減できる。例として、表1に示す諸元の平面平行マニピュレータが、1辺500mmである正方形領域で1000Nの並進力および1m/sの並進速度を要する作業を行う場合を考える。評価結果より、マニピュレータに要求される高負荷に対し、入力部に要するトルクが比較的小さく、さらに、値の変化も緩やかな作業範囲を検討すれば、図3および図4中に□で示した領域が適切な範囲として挙げられる。ここで、図中に示した単位力および単位速度に対する $T_{M,P}$, $T_{M,R}$ および $\omega_{M,P}$, $\omega_{M,R}$ の値と、実際にマニピュレータの入力軸に要する最大駆動力 T_{max} および最大駆動速度 ω_{max} との関係は次式で表される。

$$T_{max} = \begin{cases} \bar{f} \cdot R_{IN} \cdot T_{M,P} \\ \bar{f} \cdot T_{M,R} \end{cases} \dots\dots\dots (35)$$

$$\omega_{max} = \begin{cases} \bar{v} / R_{IN} \cdot \omega_{M,P} \\ \bar{v} \cdot \omega_{M,R} \end{cases} \dots\dots\dots (36)$$

決定された□の領域における $T_{M,P}$ および $\omega_{M,P}$ の最大値は、それぞれ0.6以下および3.0以下となり、実際に必要となる入力トルクおよび角速度の最大値は、上式より、それぞれ492N・m以下および3.7rad/s以下であることがわかる。また、同領域内で出力節に対し、平面に垂

Fig.5 Evaluation of the planar in-parallel actuated mechanism by manipulability ($\gamma = 0^\circ$)

直な軸周りに大きさ $10\text{N}\cdot\text{m}$ のモーメントが作用する場合、図4(a)より作業範囲における $\omega_{M,R}$ の最大値が2.0以下であることから、出力節の姿勢を保持するために入力部に必要なトルクは、式(35)より $20\text{N}\cdot\text{m}$ 以下となる。

以上のように駆動特性の評価より、適切な出力節の移動領域の決定が容易になるとともに、発生すべき力、速度に対して必要な入力、入力速度も、並進および回転運動それぞれに対して把握可能となる。

3.2 可操作性⁽²⁾との比較 マニピュレータの代表的な評価法としては、入力値の二乗和を一定とする条件下で、マニピュレータが発生する速度または力の集合がなす楕円または楕円体を利用する可操作性⁽²⁾がよく用いられる。通常は、求められた楕円の面積または楕円体の体積が大きいほどマニピュレータの特性を良好と評価する。しかし、可操作性による評価法では、物理量の異なる並進速度と回転速度、または並進力と回転力を同時に評価するため、多自由度な運動が可能なパラレルマニピュレータなどの評価に必ずしも適していない⁽⁴⁾。そこで、小菅らは、出力の並進と回転成分を、それぞれ独立に評価する方法を示している⁽⁴⁾。本論文においても、小菅らの方法に基づき、マニピュレータの可操作性に関する評価を行い、提案する駆動特性に関する評価と比較する。

図2および表1に諸元を示した平面パラレルマニピュレータの並進速度のみに着目し、可操作性に基づく評価を行う。すなわち、同マニピュレータの特性を、各入力部への入力量の二乗和を1としたときの、出力節の速度がなす楕円の面積で評価する。まず、平面パラレルマニピュレータの出力節の位置を、作業領域内で原点からX軸およびY軸方向にそれぞれ5mmずつ変化させ、各位置において発生可能な速度の集合よりなる楕円の面積を求める。得られた結果を出力節上の点Pの座標にプロットし等高線図として図5(a)に示す。なお、図中のwは求められた楕円の面積を表し、値が大きいほど、すな

わち、等高線図上において色の濃い領域ほどマニピュレータの特性が良好であることを示す。

先に示した駆動特性の評価結果と、可操作性による評価結果を比較する。本論文で提案する方法が、一定の出力値に対する入力値を評価することに対して、可操作性では、一定の入力値に対する出力値を評価することから、両方法の観点は異なるが、マニピュレータの特性が良好および良好でない出力節の位置は、両評価法ともに類似した傾向を示している。しかし、図3(b)と図5(a)を比較すると、両図中に○で示した領域近傍において、可操作性による評価では楕円の面積が比較的大きく特性が良好とされていることに対し、駆動特性による評価では比較的大きな入力を要する、特性が良好でない領域とされている。この原因として、注目した領域では、平面パラレルマニピュレータの出力速度の集合がなす楕円の長軸と短軸の長さの比が大きくなり、ある特定の方向には大きな速度を発生し易いが、速度を発生しにくい方向も存在していることが考えられる。このような特性を評価する方法として、出力される速度の集合がなす楕円の長軸に対する短軸の比に相当する条件数を用いることが提案されている⁽³⁾。そこで、図5(a)にその面積を示した楕円の条件数CNの分布を、同じく出力節の位置を変えて求め図5(b)に示す。図5(b)より、駆動特性と可操作性の評価結果が異なった領域では、条件数CNが約0.2程度である。すなわち、同領域では、出力節が発生可能な速度の出力値に、方向による大きな偏りが存在し、マニピュレータの運動方向によっては特性が必ずしも良好でないことがわかる。

以上のように、可操作性によるマニピュレータの評価では、出力される速度の集合がなす楕円の大きさとともに、条件数も考慮する必要がある。これに対し、提案する駆動特性の評価法は、あらかじめ等方的な出力を仮定してマニピュレータの特性を考慮することから、任意方向への出力が必要とされる場合に対し、より適

切な評価が行える。さらに、得られる評価値が入力部に要する具体的な物理量に関連した値であることから、アクチュエータや減速機など駆動系の選定にも有用である。

4. 結 言

本論文では、マニピュレータに用いるアクチュエータなど駆動系の選択や、作業時における姿勢の決定を容易にする評価方法について提案し、特にパラレルマニピュレータに関して、その有用性を示した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) マニピュレータが運動可能な任意方向に発生する等方的な並進力(または回転力)および並進速度(または回転速度)に対して、入力部に必要となる力、速度に関する特性を駆動特性とし、これらを容易に評価する方法を示した。
- (2) 提案する評価方法によれば、マニピュレータが運動可能な任意の方向に、ある力、速度を発生するために必要な入力や入力速度に関する特性の変化が容易に把握でき、また、実際に入力量も求められることから、作業時における姿勢の決定や入力部に連結する駆動系の選択に有用である。
- (3) 平面パラレルマニピュレータに関して、駆動特性の評価を行うとともに、代表的なマニピュレータの評価法である可操作性による評価と比較することで、提案する手法の有用性を確認した。

文 献

- (1) 安藤嘉則・稲垣莊司, ISO/9283(その3)どこで何回測定するのか, 省力と自動化, **12**(1990), 69-72.
- (2) 吉川恒夫, ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, **2-1**(1984), 63-67.
- (3) Tsai, M.J.・Chiou, Y.H., Manipulability of Manipulators, Mechanism and Machine Theory, **25-5**(1990), 575-585.
- (4) 小菅一弘・奥田実・川俣裕行・福田敏男・小塚敏紀・水野智夫, パラレルリンクマニピュレータの力解析, 機論, **60-575**, C(1994), 2338-2344.
- (5) 田所諭・高森年, ロボットマニピュレータの動作の性質を考慮した可操作性の評価法, 計測自動制御学会論文集, **29-6**, C(1994), 2338-2344.
- (6) 太田祐介・稲垣淑彦・米田完・広瀬茂男, 出力均質性の高いパラレルメカニズムを利用した省自由度歩行ロボットの研究, 日本ロボット学会誌, **18-1**(2000), 66-74.
- (7) 立矢宏・江端泰之・茶谷明義・放生明廣, ロボット用平行クランク形機構の静力学特性, 機論, **58-546**, C(1992), 552-557.
- (8) 武田行生・舟橋宏明, ロボット機構の出力の空間的等方性の評価, 機論, **61-586**, C(1995-6), 2636-2642.
- (9) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, (1988), 63., コロナ社
- (10) 文献(12)の225ページ
- (11) 文献(12)の57ページ