パラレルメカニズムの出力の大域的等方性を考慮した機構総合*

武田 行生^{*1}, 舟橋 宏明^{*1}Kinematic Synthesis of In-Parallel Actuated Mechanisms
Based on the Global Isotropy Index

Yukio TAKEDA and Hiroaki FUNABASHI

In order to synthesize a mechanism such that directional variations of the pose accuracy, the maximum operation speed and the maximum output force over the prescribed working space may become small and such that required resolution of sensors and the maximum power of actuators for realizing the required accuracy, speed and force may become minimum, a global isotropy index has been proposed. The effectiveness of the global isotropy index has been numerically confirmed through error analyses of the output displacement and kinematic syntheses of spatial in-parallel actuated mechanisms with six degrees of freedom.

Key Words: Robotics, Mechanism, In-Parallel Actuated Mechanism, Global Evaluation, Velocity Isotropy, Force Isotropy, Kinematics, Optimal Synthesis

1. 緒 言

パラレルメカニズムはその構造的特徴から、従来のロボット機構であるシリアルメカニズムでは成し遂げ得ない高精度、高速度、高剛性、高出力動力が要求される作業を行う多自由度機械装置の運動機構として注目されている。パラレルメカニズムのもつこのような優れた性質を活かすためには、特異点およびその近傍を排除して良好な運動伝達性を所要の作業領域全域で確保することがまず必要である^{(1),(2)}。近年、パラレルメカニズムをロボットマニピュレータにとどまらず、高速加工機や座標測定機へ適用するための研究開発が多く行われている。このような適用にあたっては、アクチュエータの性能をできるだけ活用し、指定領域(機構のもつ作業領域の部分領域)内での任意のポーズにおいて、任意の方向にできるだけ均一の精度、均一の大きさの速度および加速度(力)を実現する機構が要求される。本論文ではこのような機構、すなわち出力の大域的等方性に優れた機構の総合を行うための評価指数を提案する。

ところでパラレルメカニズムの運動特性評価指数としては、本論文で提案する指数以外にも運動伝達指数、ヤコビ行列の条件数などがすでに提案されている。提案指数と従来の指数との関係を調べることは、パラレルメカニズムの設計において本質的に用いるべき評価指数を明らかにする上で重要である。

以上の考察に基づき、本論文では、まず、機構出力

の代表値として、アクチュエータの出力限界に基づく出力節での最大速度および最大力を考える。そして、出力の大域的指標として指定領域全体で全方向に発生可能な速度および力を導入し、これらにアクチュエータの能力がいかに関与しているかを表す指数(大域的等方指数と呼ぶ)を提案する。具体的に3形式の6自由度空間パラレルメカニズムをとりあげ、提案指数に基づく機構総合を行う。さらに提案指数のパラレルメカニズム設計における有効性を検討するために、従来から用いられている評価指数および出力変位誤差との関係を具体的に調べ、検討を加える。

2. 大域的等方指数

機構出力の代表値として出力節における速度および力を取り上げる。これらの大きさの限界はアクチュエータの速度および力の限界により定まるものとする。機構の自由度を N とし、入力速度 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T$ と出力速度 $v = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ の間には $[J]$ をヤコビ行列として次式が成り立つ。

$$v = [J]\omega \quad (1)$$

ω の成分 $\omega_i (i=1, 2, \dots, N)$ のアクチュエータ出力限界に基づく大きさの限界を $\omega_{i,A}$ とすれば、式(1)において

$$|v_i| \leq \omega_{i,A} \quad (2)$$

を満たす v の集合は多面体(可操作性多面体と呼ぶ)をなす。 v の成分として、静止座標系O-XYZの各軸方向の並進速度 V_X, V_Y, V_Z および各軸まわりの角速度 $\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z$ をとれば、可操作性多面体は互いに次元の異なる軸を

* 原稿受付 1998年4月17日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部 (☎ 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

E-mail: takeda@mech.titech.ac.jp

それぞれ三つずつもつ座標空間に存在するため、出力(速度)の等方性を方向による v の大きさの差により評価することは無意味である。そこで本論文では、 v の成分をそれぞれ同一次元の並進速度 $V = [V_X, V_Y, V_Z]^T$ と角速度 $\Omega = [\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z]^T$ に分けて考え、それらの大きさを別々に評価することにする。具体的には次式に示す式(1),(2)を満足する最大のだ円体を導入する⁽³⁾。

$$|V|^2/r_{\omega_V}^2 + |\Omega|^2/r_{\omega_\Omega}^2 \leq 1 \quad (3)$$

r_{ω_V} および r_{ω_Ω} は出力節が全方向に発生できる並進速度および角速度の最大値であり、その算出方法は文献(3)を参照されたい。

入力之力 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]^T$ と出力之力 $[F, M]$ ($F = [F_X, F_Y, F_Z]$: 力, $M = [M_X, M_Y, M_Z]$: モーメント)についても上記の速度と同様な議論が行え、

$$\tau = [J]^T [F, M]^T \quad (4)$$

と各入力之力のアクチュエータ出力限界 $\tau_{i,A}$ を用いた条件式

$$|\tau_i| \leq \tau_{i,A} \quad (5)$$

をもとにして求められる全方向に出力できる力およびモーメントの最大値 r_{τ_F} および r_{τ_M} を用いただ円体

$$|F|^2/r_{\tau_F}^2 + |M|^2/r_{\tau_M}^2 \leq 1 \quad (6)$$

を導入する。式(3)および(6)の $r_{\omega_V}, r_{\omega_\Omega}, r_{\tau_F}, r_{\tau_M}$ は機構の幾何学的条件とアクチュエータの最大速度および最大力により定まる⁽³⁾。ここで、ロボット機構の特異点はシリアルメカニズムとパラレルメカニズムに共通に見られるタイプとパラレルメカニズムにのみ見られるタイプに大別されるが、前者の特異点では r_{ω_V} あるいは r_{ω_Ω} が零となり、後者の特異点では r_{τ_F} あるいは r_{τ_M} が零となる。

次に、機構が一つのポーズをとったときではなく指定領域内で運動する場合を考え、この領域全体で全方向に発生可能な速度と力について考える。そこで、指定領域内での $r_{\omega_V}, r_{\omega_\Omega}, r_{\tau_F}, r_{\tau_M}$ の最小値を考え、それぞれ $R_{\omega_V}, R_{\omega_\Omega}, R_{\tau_F}, R_{\tau_M}$ と表し、その領域全体での出力の速度および力に関して次の二つのだ円体を導入する。

$$\left. \begin{aligned} |V|^2/R_{\omega_V}^2 + |\Omega|^2/R_{\omega_\Omega}^2 &\leq 1 \\ |F|^2/R_{\tau_F}^2 + |M|^2/R_{\tau_M}^2 &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$R_{\omega_V}, R_{\omega_\Omega}, R_{\tau_F}, R_{\tau_M}$ はそれぞれ指定領域内でいずれのポーズをとっても出力節において全方向に発生可能な並進速度、角速度、力、モーメントを表している。ここで、 $R_{\omega_V}, R_{\omega_\Omega}, R_{\tau_F}, R_{\tau_M}$ の数値は $\omega_{i,A}, \tau_{i,A}$ の数値により変化するので、所要の速度、力が得られるように $\omega_{i,A}, \tau_{i,A}$ を求めることで、指定領域内で所要の速度と力が発生

できる機構を駆動源も含めて設計することができる。しかし、小形・軽量で制御性に優れた機構を得るためには、できるだけ小さい容量のアクチュエータで所要の速度と力が得られることが望ましい。そこで、式(7)の条件下で機構を運転する場合に出力節において得られる最大動力とアクチュエータの最大動力の比較により、機構の大域的等方性を評価することを考える。

式(7)の条件下で機構を運転する場合に機構がすべてのポーズにおいて出力できる動力 P の最大値 $P_{\max}$ は運動方向により異なり、次式の範囲で変化する。

$$\left. \begin{aligned} P_L &\leq P_{\max} \leq P_U \\ P_L &= \min.(R_{\tau_F} R_{\omega_V}, R_{\tau_M} R_{\omega_\Omega}) \\ P_U &= \max.(R_{\tau_F} R_{\omega_V}, R_{\tau_M} R_{\omega_\Omega}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

一方、出力節において得られる動力は、ロボットに具備されている各アクチュエータの最大動力 $P_{i,\max}$ の総和を越えることはないから、 $\sum_{i=1}^N P_{i,\max}$ を動力の基準値として考え、次の評価量 η_G を出力の大域的等方性の評価量として採用し、大域的等方指数と呼ぶ。

$$\eta_G = \min.(R_{\omega_V} R_{\tau_F}, R_{\omega_\Omega} R_{\tau_M}) / \sum_{i=1}^N P_{i,\max} \quad (9)$$

ここで、一般にアクチュエータの速度と力には相関があり、 ω_i および τ_i は式(2)および(5)のようにそれぞれの発生領域を断定できず、 $P_{i,\max}$ を厳密に求めることは難しい。しかし、一般に広く用いられている回転形電動サーボモータのカatalog等を参照すれば、その角速度とトルクの連続定格領域には若干垂下特性の影響が見られるものの式(2)および(5)が成り立つと見なせる場合も少なくない。そこで、本論文では式(2)および(5)が成り立つとし、 $P_{i,\max}$ を次式で定めることにする。

$$P_{i,\max} = \omega_{i,A} \tau_{i,A} \quad (10)$$

大域的等方指数 η_G の特徴を以下にまとめる。

- (1) η_G は機構の幾何学的条件とアクチュエータの最大速度および最大力により決定される無次元量である。
- (2) $\eta_G = 0$ は作業領域内に特異点があることを表す。
- (3)機構の形式・寸法のみならず ω_A および τ_A も設計パラメータとすれば、 η_G を評価指標として機構および駆動源の同時最適化を図ることができる。

従来、出力の大域的等方性の評価量としては、GosselinとAngelesによるglobal conditioning index⁽⁴⁾がある。これは作業領域内の各ポーズにおけるヤコビ行列の条件数の逆数の平均値、すなわち各ポーズにおける出力の速度の等方性の平均的指標であって、異なるポーズ間での発生速度の大きさの差については議論されていない。また、一つのポーズを対象とした出力の速度および力の等方性の評価についてはヤコビ行列の条件数

Fig.1 Types of spatial in-parallel actuated mechanisms with six degrees of freedom

Fig.2 Locations of joints on the frame link

を用いた多くの研究例があるが、速度等の大きさの異なるポーズ間での差違については検討がなされていない。さらに、入力速度に対する出力速度の大きさの評価量としては可操作度が提案されているが^{(6),(7)}、パレルメカニズムのみに見られる特異点においては出力の等方性は最悪であるが可操作度が最大(無限大)となる等、パレルメカニズムにおいては可操作度の増大と出力の等方性の向上は必ずしも一致しない。また、運動伝達指数⁽¹⁾は後述するように出力節上の対偶点における速度と作用力のなす角により定義されているため、これにより出力の速度および力の大きさを評価することはできない。

3. 出力変位誤差

機構出力の大域的等方性を考える場合、速度と力のみならず変位誤差も重要である。そこで本章では、図1に示す3形式の6自由度空間パレルメカニズムをとりあげ、出力変位誤差と第2章で提案した大域的等方指数 η_G の関係について具体的に検討を加える。

3・1 機構 図1に示す3形式A～Cはいずれも静止節と出力節の間に六つの同一形式の直列連鎖を有し、各連結連鎖に一つの能動対偶を有する6自由度空間

Fig.3 Locations of the joints on the output link

機構である。同図において、(S),(R)および(P)はそれぞれ球対偶、回転対偶および直進対偶であることを表す。各形式における能動対偶は、形式Aが連結連鎖内の直進対偶、形式Bが静止節上の回転対偶、形式Cが静止節上の直進対偶であり、図中に矢印により示してある。各機構の静止節上および出力節上の対偶配置を図2および3のように定める。同図において、形式Bにおける動座標系 $J_{1,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ の $z_{1,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)が静止節上の回転対偶軸方向を、形式Cにおける $J_{0,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ の $x_{1,i}$ が静止節上の直進対偶軸方向を表す。出力節のポーズは、静止座標系 $O - XYZ$ に対する出力節上の点Pの位置(X_P, Y_P, Z_P)および静止節上に固定された座標

系 $P-x_P y_P z_P$ の $O-XYZ$ に対するロール角 φ_R 、ピッチ角 φ_P およびヨー角 φ_Y で表す。

3・2 出力変位誤差の評価法 出力変位誤差 ΔP を位置誤差 $\Delta P_P = [\Delta X_P, \Delta Y_P, \Delta Z_P]^T$ および静止座標系各軸回りの角変位誤差 $\Delta P_O = [\Delta \theta_X, \Delta \theta_Y, \Delta \theta_Z]^T$ に分けて考える。出力変位誤差の要因としては入力変位誤差、寸法誤差等があるが、ここでは入力変位誤差 $\Delta \theta = [\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \dots, \Delta \theta_6]^T$ のみを考える。 $[\Delta P_P^T, \Delta P_O^T]^T$ と $\Delta \theta$ の間には式(1)のヤコビ行列 $[J]$ を用いて次式が成り立つとする。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_P \\ \Delta P_O \end{bmatrix} = [J] \Delta \theta \quad (11)$$

ここで、行列 $[J]$ の第 (i, j) 成分を $a_{(i, j)}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) と表し、一つのポーズにおける出力変位誤差の代表値として入力変位誤差に対する最大位置誤差 e_P および最大角変位誤差 e_O を考え、これらを次式により定義する。

$$\left. \begin{aligned} e_P &= \max \cdot (|a_{(i, j)}|)_{(i=1,2,3; j=1,2,\dots,6)} \\ e_O &= \max \cdot (|a_{(i, j)}|)_{(i=4,5,6; j=1,2,\dots,6)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

そして、指定領域内の e_P および e_O の最大値 E_P および E_O を機構の出力変位誤差の代表値とする。

3・3 結果 本論文で提案する指数 η_G は、設計時に与えられる指定領域の位置および大きさにより変化する。そこで、実用上有用な指定領域の位置および大きさをパラレルメカニズムの特性に基づき予め検討した上で η_G の出力変位誤差評価量としての有効性を検討する。まず、 η_G が出力の等方性に優れた機構を得るための指標であることから、指定領域の X, Y, Z 各軸方向の並進変位および各軸まわりの姿勢角はそれぞれ同一として、 $O-XYZ$ 空間内での中心位置と並進変位・姿勢角の大きさを指定領域の位置および大きさを表すパラメータとして定めた。そして、機構の大きさを静止節上の対偶配置円半径 R により表し、指定領域の位置および大きさを R に対して種々設定するとともに R 以外の機構定数を R を基準として実用的な範囲でランダムに変化させて η_G の数値を調べたところ、機構の大きさに対して過大な指定領域を設定するとその領域全体で良好な特性が発揮できる機構が得られなかったり、逆に機構に対して過小な指定領域を設定すると一つのポーズにおける評価と大差がなかった。以上のように検討を加えた結果、機構に対する指定領域の大きさが比較的大きくとれ、しかもその全領域において良好な特性が得られる機構定数の組が多く存在する指定領域として次式の領域を決定した。

Table 1 Ranges of variation of kinematic constants

Type A	Type B	Type C
$R = 1$	$R = 1$	$R = 1$
$0.1 \leq r/R \leq 1.5$	$0.1 \leq r/R \leq 1.5$	$0.1 \leq r/R \leq 1.5$
$0 \leq \beta_1 \leq 60^\circ$	$0 \leq \beta_1 \leq 60^\circ$	$0 \leq \beta_1 \leq 60^\circ$
-	$-90^\circ \leq \beta_2 \leq 90^\circ$	$-90^\circ \leq \beta_2 \leq 90^\circ$
-	-	$-90^\circ \leq \beta_3 \leq 90^\circ$
$0 \leq \beta_P \leq 120^\circ$	$0 \leq \beta_P \leq 60^\circ$	$0 \leq \beta_P \leq 60^\circ$
-	$3.6 \leq (l_1 + l_2)/R \leq 7.2$	$0 \leq l_1/R \leq 3.6$
-	$0.2 \leq l_1/l_2 \leq 5$	$3.6 \leq l_2/R \leq 7.2$

$$\left. \begin{aligned} -0.6R &\leq X_P \leq 0.6R \\ -0.6R &\leq Y_P \leq 0.6R \\ 2.4R &\leq Z_P \leq 3.6R \\ -30^\circ &\leq \varphi_R \leq 30^\circ \\ -30^\circ &\leq \varphi_P \leq 30^\circ \\ -30^\circ &\leq \varphi_Y \leq 30^\circ \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

実用的な機構定数の範囲として、各形式について表1の範囲を設定し、この範囲でランダムに機構定数を発生させて η_G と E_P および E_O の関係を調べた。なお、機構の対称性を考慮して、簡単のため、

$$\tau_{i,A} = 1, \omega_{i,A} = 1 (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (14)$$

とした。得られた結果のうち、 η_G と E_P の関係を図4に示す。同図より、いずれの機構においても η_G の数値が大きくなるほど位置誤差は小さくなることがわかる。すなわち、 η_G を用いて機構総合を行えば、アクチュエータの分解能に対して高精度の機構が得られる。なお、 η_G と E_O の関係も図4と同様であった。

4. 機構総合への応用

本章では、図1に示す3形式のパラレルメカニズムをとりあげ、3・3節における η_G と出力変位誤差の比較の場合と同様の理由により指定領域を式(13)で与え、この領域内で η_G が最大となる機構を表1の範囲でモンテカルロ法に基づき総合する。なお、ここでも式(14)の通りとする。

4・1 解析 従来、ロボット機構の評価指数としてさまざまなものが提案されている。ここではそれらのうち、パラレルメカニズムにおける運動伝達指数 TI の指定領域内の最小値 $TI_{\min}^{(5)}$ とヤコビ行列の条件数の逆数 C の指定領域内の平均値 $C_n^{(4)}$ をとりあげ、10000組の機構定数をランダムに発生させ、 η_G との関係を調べた。ここで、運動伝達指数 TI およびヤコビ行列の条件数の逆数 C とこれらに基づく指定領域内の評価量 $TI_{\min}$ および C_n について簡単に説明しておく。六つの入力節のうちのひとつの入力節 i ($i = 1, 2, \dots, 6$) を除いた五つの入力節を固定した状態で入力節 i の速度に対する対偶点 $J_{3,i}$ の速度を求め、この速度と $\overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}}$ のなす角を連結連鎖 i

Fig.6 Relationships between the global isotropy index η_G and the average of inverse condition number of the Jacobian matrix C_n

の変化がいずれも大きい一つの断面をそれぞれ選んで図示した。図7に示すように、B-1機構では TI および C の数値は指定領域内で大きくかつ変化が小さいが、 r_{ω_V} の数値は出力点のZ座標に対して大きく変化することがわかる。一方図8より、B-2機構ではいずれの評価量も指定領域内で大きな値をとり、しかも変化が小さいことがわかる。このように、 TI や C では速度の大きさのポーズによる変化が評価できない場合がある。

4・2 総合結果 4・1節の解析条件に加えて、形式Bについては隣接する入力節の干渉を、形式Cについては隣接する直進対偶の干渉をそれぞれ回避する条件を

Table 2 Kinematic constants and characteristics values of type-B mechanisms

	R	r	β_1	β_2	β_P	l_1	l_2
B-1	1.0	1.08	47.4°	-80.3°	3.0°	1.75	3.58
B-2	1.0	0.180	57.6°	45.8°	59.8°	2.79	3.60

	η_G	$TI_{\min}$	C_n
B-1	0.016	0.805	0.533
B-2	0.083	0.740	0.603

加えて最適機構の総合を行った。用いた手法はすでに著者らが開発したモンテカルロ法に基づく手法⁽⁵⁾である。得られた機構の寸法および評価指数の数値は表3～5に示すとおりである。これらの表より、得られた機構の評価指数 η_G 、 $TI_{\min}$ および C_n の数値は4・1節の結果を顕著に反映しており、形式Aではいずれの指数を用いてもほぼ同じ寸法・特性の機構が得られているのに対し、形式BおよびCでは採用する指数によって得られる機構の寸法・特性が異なり、 $TI_{\min}$ や C_n を評価指数とした場合には η_G が大きな機構は必ずしも得られないが、 η_G を評価指数とした場合には η_G が最大となるばかりでなく $TI_{\min}$ および C_n もこれらをそれぞれ評価指数とした場合と大差ない程度まで大きな機構が得られていることがわかる。さらに、表3～5において η_G により最適化された三つの機構の大きさには差違が認められるが、 η_G の数値を比較することによって最適機構を選択すれば、表5に示した機構を得ることができる。以上より、 η_G が機構総合における形式および量の総合に有用であり、 η_G により、出力の速度および力の大域的等方性に優れるとともに運動伝達指数およびヤコビ行列の条件数にも優れる機構が総合できる。

5. 結 論

本論文では、パラレルメカニズムの出力の大域的等方性の評価指数を提案し、これと出力変位誤差の関係を調べるとともに最適機構の総合に適用して検討を加えた。得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 機構の幾何学的条件とアクチュエータの最大速度および最大力に基づき、指定領域全体で全方向に発生可能な速度および力を表すだ円体を導入した。このだ円体の条件下で機構を運転する場合に全方向に発生可能な動力とアクチュエータの最大動力和の比により大域的等方指数 η_G を定義し、これを機構出力の大域的等方性の評価指数として提案した。 η_G は無次元量であり、 $\eta_G = 0$ は指定領域内に特異点が存在することを意味する。

(2) 入力変位誤差に起因する最大出力変位誤差と η_G の関係を調べたところ、 η_G が大きいほど最大出力変位誤差が小さく、 η_G は変位誤差の評価量としても有効で

Fig.6 Relationships between the global isotropy index η_G and the average of inverse condition number of the Jacobian matrix C_n

の変化がいずれも大きい一つの断面をそれぞれ選んで図示した。図7に示すように、B-1機構では TI および C の値は指定領域内で大きくかつ変化が小さいが、 r_{wv} の値は出力点のZ座標に対して大きく変化することがわかる。一方図8より、B-2機構ではいずれの評価量も指定領域内で大きな値をとり、しかも変化が小さいことがわかる。このように、 TI や C では速度の大きさのポーズによる変化が評価できない場合がある。

4・2 総合結果 4・1節の解析条件に加えて、形式Bについては隣接する入力節の干渉を、形式Cについては隣接する直進対偶の干渉をそれぞれ回避する条件を

Table 2 Kinematic constants and characteristics values of type-B mechanisms

	R	r	β_1	β_2	β_P	l_1	l_2
B-1	1.0	1.08	47.4°	-80.3°	3.0°	1.75	3.58
B-2	1.0	0.180	57.6°	45.8°	59.8°	2.79	3.60
		η_G	$TI_{\min}$	C_n			
B-1		0.016	0.805	0.533			
B-2		0.083	0.740	0.603			

加えて最適機構の総合を行った。用いた手法はすでに著者らが開発したモンテカルロ法に基づく手法⁽⁵⁾である。得られた機構の寸法および評価指数の数値は表3～5に示すとおりである。これらの表より、得られた機構の評価指数 η_G 、 $TI_{\min}$ および C_n の数値は4・1節の結果を顕著に反映しており、形式Aではいずれの指数を用いてもほぼ同じ寸法・特性の機構が得られているのに対し、形式BおよびCでは採用する指数によって得られる機構の寸法・特性が異なり、 $TI_{\min}$ や C_n を評価指数とした場合には η_G が大きな機構は必ずしも得られないが、 η_G を評価指数とした場合には η_G が最大となるばかりでなく $TI_{\min}$ および C_n もこれらをそれぞれ評価指数とした場合と大差ない程度まで大きな機構が得られていることがわかる。さらに、表3～5において η_G により最適化された三つの機構の大きさには差違が認められるが、 η_G の数値を比較することによって最適機構を選択すれば、表5に示した機構を得ることができる。以上より、 η_G が機構総合における形式および量の総合に有用であり、 η_G により、出力の速度および力の大域的等方性に優れるとともに運動伝達指数およびヤコビ行列の条件数にも優れる機構が総合できる。

5. 結 論

本論文では、パラレルメカニズムの出力の大域的等方性の評価指数を提案し、これと出力変位誤差の関係を調べるとともに最適機構の総合に適用して検討を加えた。得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 機構の幾何学的条件とアクチュエータの最大速度および最大力に基づき、指定領域全体で全方向に発生可能な速度および力を表す円体を導入した。この円体の条件下で機構を運転する場合に全方向に発生可能な動力とアクチュエータの最大動力和の比により大域的等方指数 η_G を定義し、これを機構出力の大域的等方性の評価指数として提案した。 η_G は無次元量であり、 $\eta_G = 0$ は指定領域内に特異点が存在することを意味する。

(2) 入力変位誤差に起因する最大出力変位誤差と η_G の関係を調べたところ、 η_G が大きいほど最大出力変位誤差が小さく、 η_G は変位誤差の評価量としても有効で

(a) the maximum translatory velocity r_{wv} (b) the transmission index TI (c) the inverse of condition number C
Fig.7 Maps of characteristics values in YZ plane for the B-1 mechanism ($X = -0.3, \varphi_R = 0^\circ, \varphi_P = 30^\circ, \varphi_Y = 0^\circ$)

(a) the maximum translatory velocity r_{wv} (b) the transmission index TI (c) the inverse of condition number C
Fig.8 Maps of characteristics values in YZ plane for the B-2 mechanism ($X = 0.6, \varphi = 0^\circ, \varphi_P = -30^\circ, \varphi_Y = 0^\circ$)

Table 3 Result of synthesis of type A

	Index		
	η_G	$TI_{\min}$	C_n
R	1.0	1.0	1.0
r	0.154	0.183	0.188
β_1	17.2°	24.1°	21.0°
β_P	103.8°	112.6°	111.4°
η_G	0.062	0.061	0.061
$TI_{\min}$	0.468	0.479	0.478
C_n	0.227	0.228	0.228

Table 4 Result of synthesis of type B

	Index		
	η_G	$TI_{\min}$	C_n
R	1.0	1.0	1.0
r	0.956	1.453	1.471
β_1	52.8°	38.0°	28.7°
β_2	24.1°	17.2°	12.3°
β_P	59.9°	56.6°	58.0°
l_1	1.89	2.02	2.22
l_2	2.77	3.48	3.64
η_G	0.075	0.035	0.037
$TI_{\min}$	0.592	0.781	0.746
C_n	0.509	0.507	0.576

Table 5 Result of synthesis of type C

	Index		
	η_G	$TI_{\min}$	C_n
R	1.0	1.0	1.0
r	0.661	0.756	0.829
β_1	0.4°	37.1°	28.9°
β_2	33.2°	70.1°	32.5°
β_3	-48.2°	-87.3°	-48.9°
β_P	52.4°	28.2°	57.8°
l_1	1.48	3.41	1.85
l_2	7.14	5.17	7.17
η_G	0.126	0.077	0.125
$TI_{\min}$	0.865	0.913	0.859
C_n	0.606	0.528	0.620

あることがわかった。

(3) 3形式のパラレルメカニズムを対象として、 η_G により最適機構の総合を行い、 η_G が機構の形式および量の総合において有用であり、 η_G により、出力の速度および力の大域的等方性に優れるとともに運動伝達指数およびヤコビ行列の条件数にも優れる機構が総合できることが確認された。

文 献

- (1) 武田行生, 舟橋宏明: パラレルマニピュレータにおける運動伝達性, 機論(C), 59-560(1993), pp.1142-1147.
- (2) 武田行生, 舟橋宏明: パラレルマニピュレータの特異点とその近傍における運動特性および静力学特性, 機論(C),

60-570(1994), pp.701-708.

- (3) 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(C), 61-586(1995), pp.2636-2642.
- (4) C.Gosselin and J.Angles: A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators, Trans. ASME, J. of M.T.A.D., Vol.113(1991), pp.220-226.
- (5) 武田行生, 舟橋宏明: 運動伝達性に優れた6自由度空間パラレルマニピュレータの開発(第1報, モンテカルロ法に基づく機構定数領域の抽出), 機論(C), 61-589(1995), pp.3781-3788.
- (6) 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), pp.63-67.
- (7) 内山勝, 清水邦敏, 箱守京次郎: 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(1985), pp.190-196.