アクチュエータ配置の違いによる 直動型パラレルメカニズムの運動特性変化*

増田 峰知^{*1}, 藤原 基芳^{*2}, 新井 健生^{*3}

Specific Kinematic Changes in a Linear-Actuated Parallel Mechanism According to Differences in Actuator Arrangement

Takanori MASUDA^{*4}, Motoyoshi FUJIWARA and Tatsuo ARAI

^{**} Metals Lab., Industrial Research Div. of the Mie Prefectural Science and Technology Promotion Center,
208 Shichi, Kuwana-shi, Mie, 511-0937 Japan

Parallel mechanisms driven by fixed linear actuators promise high speed and high output, thanks to lightweight movable parts. Several types of mechanism applying this mechanical principle are already known. Although these have different methods of actuator arrangement, they may be considered the same mechanism since they can be treated using the same kinematics. However, it is not known how the output characteristics differ with differences in actuator arrangement. The present report first shows the general kinematics that can be applied regardless of actuator arrangement. Next, changes are shown in the output characteristics occurring with changes in the actuator layout angle in a linear-actuated parallel mechanism with radially arranged actuators. The moving range and motion transmission index were used to determine the output characteristics. A total transmission index integrating the transmission index into the movable space is proposed, and the effects of design parameters other than actuator layout angle were investigated while giving weight to the motion transmissibility. The results show that the best actuator layout angle is 45–75 (deg.).

Key Words: Parallel Mechanism, Linear Actuator, Kinematics, Moving Space, Motion Transmissibility

1. 緒 言

固定された直動アクチュエータを持つパラレルメカニズムは、高速、高精度、高出力な多自由度機構^①である。本報において、以降この機構を直動型パラレルメカニズムと呼ぶ。図1は、代表的な6自由度直動型パラレルメカニズムのイメージ図である。この機構の特長は、アクチュエータ自身が動く伸縮型のパラレルメカニズム（例えば、スチュワートプラットフォーム^②）と比較して、アクチュエータ自体を固定できるため、可動部を軽量化できることである。直動型パラレルメカニズムは、Merket^③により学術的に提案されているが、それ以前よりもこの原理を用いた機構は存在し、その後発表されたものと併せて、いろいろなアクチュエータの配置形態^{④⑤}が知られている。これらのアクチュエータ配置方法を図2に示す。

直動型パラレルメカニズムの出力特性は、アクチュエータ配置方法などの設計パラメータの組み合わせにより、大きく変化することが予想されるにもかかわらず

ず、それがどのように影響するかは知られていない。そのため、直動型パラレルメカニズムの設計パラメータ変数の組み合わせと機構特性の関係を明らかにすることが望まれる。

Fig. 1 Linear-actuated parallel mechanism

Fig. 2 Actuator arrangements

* 原稿受付 2000年8月7日。

^{*1} 正員, 三重県科学技術振興センター工業研究部金属研究室 (〒511-0937 三重県桑名市志知208)。

^{*2} 正員, 三重県科学技術振興センター工業研究部機械情報電子グループ (〒514-0819 津市高茶屋5-5-45)。

^{*3} 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3)。

E-mail: masudt01@pref.mie.jp

本報では、まずアクチュエータ配置によらない直動型パラレルメカニズムの運動学、静力学について整理した一般式を示す。つぎに、アクチュエータ配置角度を変えた場合の出力特性変化について比較検討する。出力特性の評価基準は、動作領域、運動伝達指数、及びこれらを総合した総運動伝達指数を用いる。最後に、得られた結果を総合して、アクチュエータ配置角度の選択について考察を行う。

2. 直動型パラレルメカニズム

2.1 一般運動学 ここで、直動型パラレルメカニズムの一般運動学⁹⁾を示す。図3は、計算に用いた幾何関係及びパラメータの定義である。図3において、手先の位置ベクトル p と姿勢を表す回転行列 R を与えた時、式(1)が成り立つ。

$$p + R^T b_i = c_i a_i + z_i \quad (i=1 \sim 6) \quad (1)$$

左辺を L_i とし、整理して両辺を二乗すると、式(2)に示す制御量 c_i の2次式を得る。

$$c_i^2 + 2L_i \cdot a_i c_i + L_i^2 - z_i^2 = 0 \quad (2)$$

$$\text{但し, } L_i = p + R^T b_i, a_i^2 = 1, z_i^2 = 1$$

よって、2次式公式より、制御量 c_i は式(3)になる。

$$c_i = (L_i \cdot a_i) \pm ((L_i \cdot a_i)^2 - L_i^2 + z_i^2)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、式(3)は2つの逆運動学解を持つが、本報でのシミュレーション計算では、実機の動作範囲に基づき、常に負側を使用する。

速度の関係を表す微小運動学は、式(1)の両辺を微分して整理すると、式(4)で示される。

$$\delta p + \delta R^T b_i - \delta b_i = a_i \delta c_i + z_i \delta z_i \quad (4)$$

$$\text{但し, } \delta R^T b_i = 0, \delta b_i = 0, \delta a_i = 0, \delta z_i = 0$$

ここで左辺第2項について式(5)のように整理する。

$$\delta R^T b_i = R_{\delta \Omega}^T R^T b_i$$

Fig.3 Geometry of kinematics

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} 0 & -\delta \Omega_z & \delta \Omega_y \\ \delta \Omega_z & 0 & -\delta \Omega_x \\ -\delta \Omega_y & \delta \Omega_x & 0 \end{bmatrix} R^T b_i \\ &= \delta \Omega \times R^T b_i (\times: \text{外積}) \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)の両辺に z_i と内積をとり整理する。

$$z_i^T \cdot \delta p + (R^T b_i \times z_i) \cdot \delta \Omega - z_i^T \cdot a_i \delta c_i \quad (6)$$

$$\text{但し, } z_i^T \cdot \delta z_i = 0$$

これを、ヤコビ行列を用い表記すると式(7)になる。

$$J_1 \delta e = J_2 \delta c \quad (7)$$

但し、

$$\delta e: \text{手先の微小変位} = (\delta p^T, \delta \Omega^T)^T$$

$$\delta p: \text{手先の微小並進運動}$$

$$\delta \Omega: \text{手先の微小回転運動}$$

$$\delta c: \text{アクチュエータの微小変位}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} z_1^T & (R^T b_1 \times z_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ z_6^T & (R^T b_6 \times z_6)^T \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \text{diag}(z_1^T a_1 \cdots z_6^T a_6)$$

2.2 アクチュエータ配置角度の設定条件

運動学から分かるように、静的な出力特性に影響を及ぼす要因は、ヤコビ行列を構成する z_i , b_i , a_i の3つである。 a_i は、固定された直動アクチュエータの方向を表し、直動型パラレルメカニズムの特徴を最も表す設計パラメータである。そこで、本報では、 a_i の違いを中心に出力特性の変化を検討する。しかし、図2で示した機構を広く統一的に取り扱うことは困難であるため、本報では、アクチュエータ2本1組を120(deg)対称で放射状に配置した直動型パラレルメカニズムを対象にして、直動アクチュエータの配置角度を変えたときの出力特性の変化を調べる。この時、連結ロッドの構成は、スチュワートプラットフォームを参考に、図4に示すような8面体としてこれを拡張する。 a_i については、図5のように、XY方向を原点から放射状に配置された条件に固定し、Z方向への配置角度を θ (deg)で表す。計算は、ベース面(XY平面)に平行な状態(0(deg))から、Z軸に平行な状態(90(deg))までとする。

2.3 アクチュエータ配置角以外の設計パラメータ

z_i は、機構の設計パラメータ(ベース半径、手先半径、連結ロッド長さ、及びオフセット角)及び手先の位置姿勢により決まる。 b_i の影響は、ここに反映される。ここで、手先半径 b_e 及び連結ロッド長さ l_i は、ベース半径 b_i で正規化して考える。オフセット角 ϕ_i は、図5に示すようなジョイントの120度対称の配置基準線からのずらし角で、ベースのジョイントとそ

Fig. 4 Octahedron structure for basic simulation model

Fig. 5 Simulation condition

Table 1 Design parameters for simulation

Parameter		Ratio/Data
Actuator angle	θ	0~90(deg)
Basradius	$ b $	1
Actuator stroke	-	1
End plate radius	$ s $	0.25-1.00
Connecting rod length	l	1.00-2.00
Offset angle	α_0	0~30(deg)

れに対応する手先側のジョイントの相対的な位置関係に影響するパラメータである。

なお、本報で取り扱う機構の設計パラメータは、 $(l/|b|, |b|/|s|, \text{offset angle}) = (1.25, 0.25, 0)$ 、 $\alpha_0 = \alpha_0$ を基準にしている。また、手先の姿勢変化は無いものとし、アクチュエータの有効ストロークは、ベース半径と同じとして計算している。これらの評価条件の概要を図5、表1にまとめる。実際の計算では、 $|b|$ を400(mm)として、以降の計算を行っている。

3. 動作領域による評価

3.1 動作領域の定義 本報において、動作領域は、単位体積で正規化された手先到達領域とする。具体的な計算方法は、手先座標を適当なピッチ（実際には10(mm)）で空間走査した時、逆運動学計算が成立

Fig. 6 Movable space at XZ cross section by actuator layout angle

し、アクチュエータの有効ストローク内で解が存在する場合の空間点の合計にピッチ分の単位体積（実際には1000(mm³))を乗じたものとする。更に、ベース半径を一边とする立方体で除して正規化したものを動作領域とする。

3.2 動作領域外観 図6は、アクチュエータ配置角度が0, 30, 60, 90(deg)の時の可動領域形状をXZ断面で示したものである。但し、連結ロッド長さ1.25, 手先半径0.25, オフセット角0(deg), Z位置はハンド座標系で示してある。図より、可動領域は、60(deg)で最大となり、0(deg)では小さな領域しか得られない。動作領域の形状は、配置角度が小さいときはX軸方向に、配置角度が大きいたときはZ軸方向に、すなわちアクチュエータの運動方向と同じ向きに広がっている。また、アクチュエータ配置角によらず領域下限は一定であった。

4. 運動伝達指数による評価

4.1 運動伝達性の定義 武田の運動伝達指数⁽⁹⁾は、圧力角の考え方を多自由度に拡大した評価値で、手先への運動伝達性を示す評価値である。運動伝達性を表す指数 π (Transmission Index)は、手先のジョイント i の速度方向と力方向のなす角を α_i としたときの最小 $\cos \alpha_i$ であり、 $\pi=1$ の時、最も運動伝達性が良く、 $\pi=0$ の時、特異な状態である。このように π は、1~0 の値で評価できるため、他の指標と組み合わせて使用する上で、有効な評価値である。

直動型パラレルメカニズムに適用したこの指標を、図7に示す。直動型パラレルメカニズムでは、力の伝達方向はリンクの方向ベクトルと同じであり、そのベクトルは z である。手先ジョイント i の速度ベクトルは、式(8)で表されるため、式(9)においてアクチュエータ微小変位を1軸づつ入力して得ている。

$$\dot{\mathbf{r}} = \delta \mathbf{p} + \delta \mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_i \quad (\mathbf{x}: \text{ベクトル積}) \quad (8)$$

$$(\delta p^T \delta \Omega^T)^T = J_1^{-1} J_2 \delta c \quad (9)$$

よって、運動伝達指数 Π は、式(10)で表される。

$$\Pi = \min(\cos \alpha_1, \dots, \cos \alpha_d) \quad (10)$$

但し、 $\cos \alpha_i = v_i \cdot z / \|v_i\| \|z\|$

Fig. 7 Motion transmissibility (Π)

Fig. 8 Change in motion transmissibility by z position, $(X, Y, \|s\|/b_1, \|l\|/b_2, \text{offset}) = (0, 0, 0.25, 1.25, 0)$

Fig. 9 Change in motion transmissibility by x position, $(Y, Z, \|s\|/b_1, \|l\|/b_2, \text{offset}) = (0, 0.5, 0.25, 1.25, 0)$

Fig. 10 Change in motion transmissibility by XZ cross section, $(\theta, Y, \|s\|/b_1, \|l\|/b_2, \text{offset}) = (60, 0, 0.25, 1.25, 0)$

42 動作領域中の運動伝達性の変化 運動伝達

指数は、手先の位置及び姿勢により変化する。図 8, 9 は、それぞれ $(xy)=(0,0)$ で Z 位置を変えた場合と、 $(yz)=(0,0.5)$ で x 位置を変えた場合の Π の変化をアクチュエータ配置角度別に示したものである。但し、姿勢変化は与えず、手先半径 0.25, 連結ロッド長さ 1.25, オフセット角 0(deg)である。図 8 では、最大の Π は、 $\theta=60$ (deg), $Z=0.05$ の時、0.9805 であった。図 8, 9 の横軸は、動作領域の広さを表している。これらの図より、 Π が良く、かつ動作領域も広い条件は、図上方で横軸に大きい場合である。この条件には、アクチュエータ配置角度が $75 \sim 90$ (deg) の場合が当てはまる。なお、図 8 において、 90 (deg) の場合は、 Π が一定である。これはすべてのアクチュエータの方向ベクトルが、 Z 軸方向と一致しているため、 Z 位置の違いによる特性変化が無いためである。図 9 で、 0 (deg) は領域外である。

図 10 は、アクチュエータ配置角を 60 (deg) に固定した時、 Π を XZ 断面で示したものである。但し、連結ロッド長さ 1.25, 手先半径 0.25, オフセット角 0 (deg) である。

5. 総運動伝達指数による評価

5.1 総運動伝達指数 (Total Π) ここで、動作領域と運動伝達性を総合する評価指数を考える。本報では、動作領域中の運動伝達性を動作領域全体で合計した総運動伝達指数 Total Π を提案する。

具体的な計算方法は、まず手先に姿勢変化を与えない条件で XYZ に走査し、逆運動学が成立する時、逐次運動伝達指数を合計する。次に一辺の長さがベース半径の立方体を単位体積とし、これで除して大きさの違いを正規化する。本報では、この値を Total Π として評価値に用いる。これは、式(11)及び図 11 に示すように、 Π を動作領域体積で積分したものを意味し、動作領域とその平均 Π の積と同義である。

$$\text{Total } \Pi = \text{Volume normalized } \sum \Pi_{(xyz)} \quad (11)$$

この指標を用いて、次項以下にアクチュエータ配置角の影響を、これ以外のパラメータの変化が与える影響と同時に調べることにする。

Fig. 11 Total Π

Fig. 12 Change in $Total TI$ by connecting rod length, $(l_3/b_3, \text{offset}) = (0.25, 0)$

Fig. 13 Change in $Total TI$ by end plate, $(l_3/b_3, \text{offset}) = (1.25, 0)$

52 α 以外の設計パラメータ (1) 連結ロッド) の影響 図 12 は、連結ロッド長さ別に、アクチュエータ配置角と $Total TI$ の関係を示している。但し、手先半径 0.25、オフセット角 0 (deg) である。図 12 より $Total TI$ は、連結ロッド長さ高いものとなった。アクチュエータ配置角が、45~60 (deg) 程度の時に $Total TI$ が最大となる。 $Total TI$ が最大になる位置は、連結ロッド長さが長くなるほど、アクチュエータ配置角が大きくなる側に移動している。連結ロッドが長いほど $Total TI$ は大きくなっているが、一般に連結ロッドが長い場合、手先で精度が劣化⁶⁾するため、その選択には注意が必要である。

53 α 以外の設計パラメータ (2) 手先半径) の影響 図 13 は、手先半径別に、アクチュエータ配置角と $Total TI$ の関係を示している。但し、連結ロッド長さ 1.25、オフセット角 0 (deg) である。 $Total TI$ は、手先半径が小さいほど良好であった。ピークは、アクチュエータ配置角が 45~70 (deg) の時に発生しているが手先半径が大きいくほど、アクチュエータ配置角が大きくなる側に移動している。また、 $Total TI$ の大きさより、手先半径の違いは、連結ロッド長さに比べ、 $Total TI$ への影響が小さい。

Fig. 14 Change in $Total TI$ by offset angle, $(l_3/b_3, l_1/b_1) = (0.25, 1.25)$

Fig. 15 Singularity when the offset angle is 30 degrees

54 α 以外の設計パラメータ (3) オフセット角) の影響 図 14 は、オフセット角別に、アクチュエータ配置角と $Total TI$ の関係を示している。但し、連結ロッド長さ 1.25、手先半径 0.25 である。図 14 より、オフセット角が小さいほど運動伝達性は良好であった。オフセット角が 30 (deg) の時は、 $Total TI$ はすべて 0 となった。この時、機構は、図 15 に示すようにすべての連結ロッドの直線が一点で交わるため特異点¹⁰⁾となり、Z 軸周りに出力を発生できない。よって、アクチュエータを放射状に配置した機構の場合、オフセット角は小さく設定することが望ましい。

55 重みを加えた $Total TI$ の評価 ここまで $Total TI$ は、動作領域と TI を総合した指数として扱ってきた。しかしこの値は、動作領域が広くて運動伝達性が悪い場合と、動作領域が狭くて運動伝達性が良い場合に同じ値になる恐れがある。そこで、この項では、動作領域と運動伝達性に重みを与える場合を考える。本報では、 TI が 0~1 の値で評価できることを利用して、 TI の重みを、 TI を n 回乗ずることで得るものとし、式(12)に示す。この時 n は、 TI の重み値となる。即ち、動作領域に比較して運動伝達性を重視する場合は、 n を大きくして評価すれば良い。

$$Total TI(n) = \text{Volumenormalized } \Sigma (TI_{\alpha})^n \quad (12)$$

図 16 は、連結ロッド長さ 1.25、手先半径 0.25、オフセット角 0 の条件で、 n と $Total TI$ の関係をアクチュエータ配置角別に整理したものである。図 16 から、動

Fig. 16 Weighting for $Total TI$ by actuator layout angle, $(l_1/l_2, l_3/l_2, offset) = (0.25, 1.25, 0)$

作領域を重視する場合($n=0$ として計算)は, アクチュエータ配置角 45 (deg)が優れているが, 運動伝達性を重視する場合, 即ち n を大きくするに従い, 75 (deg)が優れていることが分かる。

6. 結 言

直動アクチュエータを放射状に配置した直動型パラレルメカニズムについて, アクチュエータ配置が出力特性に及ぼす影響を動作領域, 運動伝達指数 TI 及びこれらを統合した総運動伝達指数 $Total TI$ で評価した結果, 以下の知見を得た。

- (1) アクチュエータ配置方法によらない直動型パラレルメカニズムの一般運動学を整理した。
- (2) アクチュエータ配置角が 90 (deg)の時は, Z 軸方向の特性が一定になり, 手先の Z 位置に関わらず同じ運動伝達性が得られる。
- (3) TI を動作領域で積分し, ベース半径で正規化した指標として $Total TI$ を提案した。この指標を用いて, アクチュエータ配置角の影響を調べたところ, $45 \sim 75$ (deg)が優れている。
- (4) アクチュエータ配置角以外の設計パラメータの違いが, $Total TI$ に与える影響を調べた。連結ロッド長さは長い方が優れ, 手先半径は短い方が優れていて, オフセット角は, 30 (deg)の時は特異点になるため, 小さい方が望ましいことが判った。
- (5) $Total TI$ の計算過程で TI を n 乗することで, n を運動伝達指数の重み係数として見なすことができる。これによれば, アクチュエータ配置角は, 運動伝達性を重視するときは 75 (deg)が, 動作領域を重視するときは 45 (deg)が優れている。

本報での計算は, 機構部品同士の干渉を考慮していない。しかし, アクチュエータ配置角を $60 \sim 75$ (deg)を, 固定直動軸受けで実現すると, 機構干渉の問題が発生する。またシリンダ方式で実現すると, 干渉

からは回避できるが, リンクに曲げモーメントが発生する。これらを考慮した解析は, 今後の課題である。

文 献

- (1) 新井, 谷川, J-P.Merlet, 千代: “直動固定型パラレルメカニズムの開発”. 第 13 回日本ロボット学会 学術講演会予稿集 Vol.1, p.55-56 (1995)
- (2) D. Stewart: “A platform with six Degrees of freedom”. Proc. Inst. Mec. Eng. 1, Vol.180, No.15, p.371-386 (1965)
- (3) J-P.Merlet and C.Gosselin: “Nouvelle architecture pour un manipulateur parallele a six degres de liberte”. Mech. Mach. Theory (in French), Vol.26, No.1, p.77-90 (1991)
- (4) 増田, 藤原, 新井: “垂直直動型パラレルメカニズムの開発”. 機論 C, Vol.65, No.638, p.4076-4083 (1999)
- (5) 橋本: “リニアアクチュエータを用いた直動固定型パラレルメカニズム”. 第 15 回日本ロボット学会学術講演会, Vol.3, p.645-646 (1997)
- (6) 佐藤: “動揺装置”. 特公平 7-54418, 特許公報 (1995)
- (7) 遠山: “パラレルメカニズムの工作機械への応用”. 精密工学会第 236 回講習会パラレルメカニズムの最新技術に関する講習会, p.26-29 (1997)
- (8) M. Honegger: “Nonlinear Adaptive Control of a 6 DOF Parallel Manipulator”. MOVIC 98, Vol.3, p.961-966 (1998)
- (9) 新井: “パラレルメカニズムの特徴と応用”. 日本ロボット学会第 54 回講習会ロボットメカニズムの設計と実例, p.31-40 (1998)
- (10) 武田, 舟橋: “パラレルマニピュレータにおける運動伝達性”. 機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.560, p.1142-1147 (1993)
- (11) 杉本: “機構の特異点に関する考察”. 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.4, p.550-556 (1993)