

アクチュエータ配置の違いによる直動型平行メカニズムの運動特性変化

増田 峰知* 家城 悌* 藤原 基芳** 新井 健生***

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

by Takanori MASUDA, Tei IEKI, Motoyoshi FUJIWARA and Tatsuo ARAI

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 moving range 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, kinematics, moving space, motion transmissibility

1. 緒言

著者らは、前報¹⁾において直動型平行メカニズムを用いて、ベアリング組立作業をモデルとした高精度高負荷組立作業の自動化について報告した。試作した装置は、垂直方式のアクチュエータ配置を採用している。しかし、このアクチュエータ配置法についての最適化までは検討していなかった。本報では、出力効率の良いアクチュエータ配置を検討するために、シミュレーションによって出力特性の変化を検討する。

固定された直動アクチュエータを持つ平行メカニズムは、高速、高精度、高出力な多自由度機構²⁾である。本報において、以降この機構を直動型平行メカニズムと呼ぶ。図1は、代表的な6自由度直動型平行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平行メカニズム（例えば、スチュワートプラットフォーム³⁾）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。直動型平行メカニズムは、Merlet⁴⁾により学術的に提案されているが、それ以前からもこの原理を

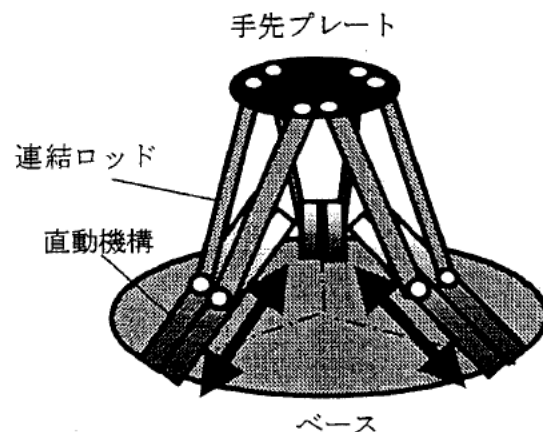


図1 直動型平行メカニズム

- * 金属センター研究グループ
- ** 機械電子グループ
- *** 大阪大学

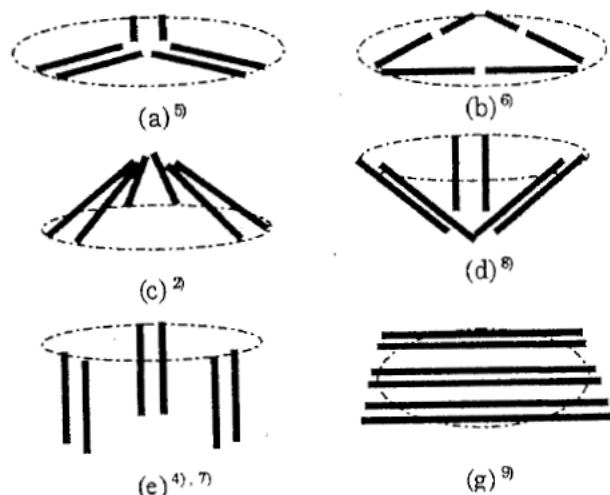


図2 アクチュエータ配置方法の違いによる直動型平行メカニズムの形態

用いた機構は存在し、その後に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^{4)~9)}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。

直動型平行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、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、直動型平行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。

本報では、まず直動型平行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. 直動型平行メカニズム

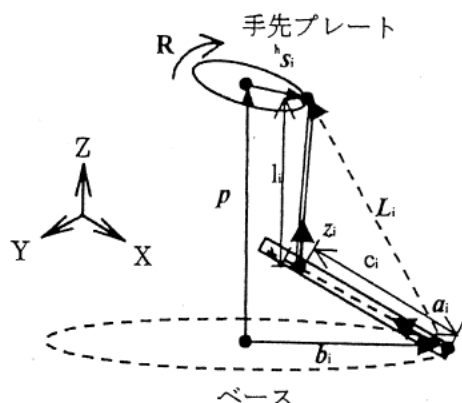
2.1 一般運動学

ここで、直動型平行メカニズムの一般運動学¹⁰⁾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。

$$p + R^h s - b_i = c_i a_i + l_i z_i \quad (i=1 \sim 6) \quad (1)$$

左辺を L_i とし、整理して両辺を二乗すると、式



- b_i : ベース半径
- h_s : 手先プレート半径
- l_i : 連結ロッド長さ
- c_i : アクチュエータ制御量
- a_i : アクチュエータ方向単位ベクトル
- p : 手先プレート中心位置ベクトル
- R : 手先プレート姿勢行列

図3 幾何関係とパラメータ定義

図3 幾何関係とパラメータ定義

(2)に示す制御量 c_i の2次式を得る。

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

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

よって、2次式公式より、制御量 c_i は式(3)になる。

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

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。

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

$$\text{但し, } R \delta^h s = 0, \delta b_i = 0, \delta a_i = 0, \delta l_i = 0$$

ここで左辺第2項について式(5)のように整理する。

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

式(4)の両辺に z_i^T と内積をとり整理する。

$$z_i^T \cdot \delta p + (R^h s_i \times z_i^T) \cdot \delta \Omega = z_i^T \cdot a_i \delta c_i \quad (6)$$

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。

$$J_1 \delta e = J_2 \delta c \tag{7}$$

但し、

δe : 手先の微小変位 $= (\delta p^T, \delta \Omega^T)^T$

δp : 手先の微小並進運動

$\delta \Omega$: 手先の微小回転運動

δc : アクチュエータの微小変位

$$J_1 = \begin{pmatrix} z_1^T & (R^h s_1 \times z_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ z_6^T & (R^h s_6 \times z_6)^T \end{pmatrix}$$

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

静力学は、仮想仕事の原理から式(4)で表わされる。

$$T = J^T F \tag{8}$$

但し、 $J = J_1^{-1} J_2$

T : アクチュエータ出力 $\{ t_1 \cdots t_6 \}^T$

F : 手先出力 $\{ f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z \}^T$

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 , $^h s_i$, 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、直動型平行メカニズムの特徴をも表す設計パラメータである。そこで、本報では、 a_i の変化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平行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。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。

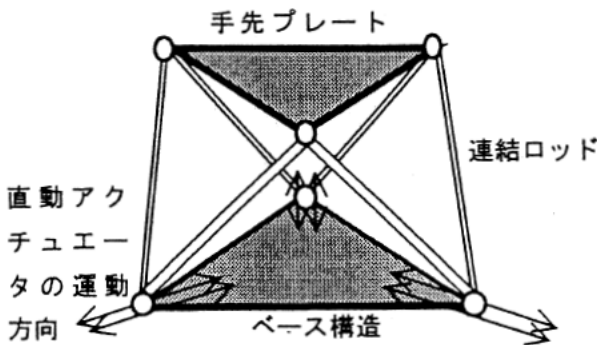
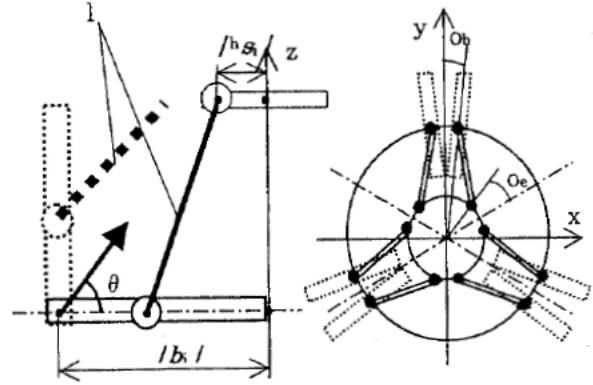


図4 シミュレーションモデルに用いた8面体構造

表1 シミュレーション用統計パラメータ

設計パラメータ		寸法比/角度値
アクチュエータ配置角	θ	0 ~ 90 (deg.)
ベース半径	$ b_i $	1
アクチュエータストローク	-	1
手先半径	$ s_i $	0.25-1.00
連結ロッド長さ	l_i	1.00-2.00
オフセット角	o_e, o_b	0 ~ 30 (deg.)



直動アクチュエータ

図5 シミュレーション条件

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。 $^h s_i$ は、この中に含まれる。ここで、手先半径 $|s_i|$, 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 o_e, o_b 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れし角で、ベースのジョイントとそ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、 $(|s_i|/|b_i|, l_i/|b_i|, \text{offset angle}) = (1.25, 0.25, 0)$, $o_e = o_b$ 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、 $|b_i|$ を 400 (mm) とし、以降の計算を行っている。

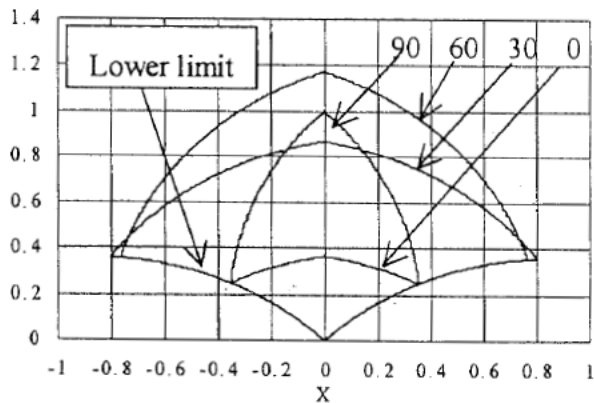
3. 動作領域による評価

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、ベース半径を一辺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x-z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。



(y, ^hs/^lb₁, l/^lb₁, offset angle) = (0, 1.25, 0.25, 0)

図8 X-Z面での動作領域

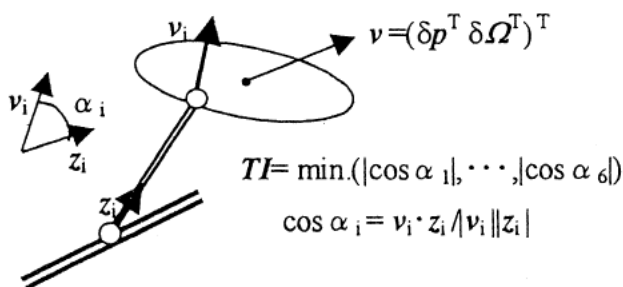


図7 運動伝達指数 (TI) 定義

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¹⁾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TI (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 θ_i としたときの最小 $\cos(\theta_i)$ であり、 $TI = 1$ の時、最も運動伝達性が良く、 $TI = 0$ の時、特異な状態である。このようにTIは、1~0の値で評価できるため、他の指標と組み合わせ使用の上で、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_i である。手先ジョイント i の速度 v_i は式(9)で表される。よって、運動伝達指数TIは、式(10)となる。実際の計算プログラムにおいては、手先速度は、アクチュエータを一軸ずつ動かしてヤコビ逆行列に乗じることで求めている。

$$v_i = p + \omega \times {}^h s^T \quad (\times \text{はベクトル積}) \quad (9)$$

但し、^hs: 手先ジョイント座標

p: 手先並進速度

ω : 手先回転角速度

この時、 $[p \ \omega]^T = J^T \delta c$

$$TI = \min(|\cos \theta_1|, \dots, |\cos \theta_6|) \quad (10)$$

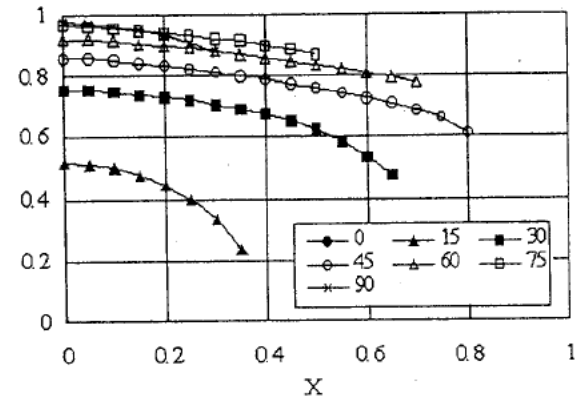
但し、 $\cos \theta_i = v_i \cdot z_i / |v_i| |z_i|$

4. 2 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(x,y)=(0,0)でz位置を変えた場合と、(y,z)=(0,0.5)でx位置を変えた場合のTI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TI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、TI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75~90 (deg)の場合が当てはまる。なお、図8において、90 (deg)の場合は、TI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

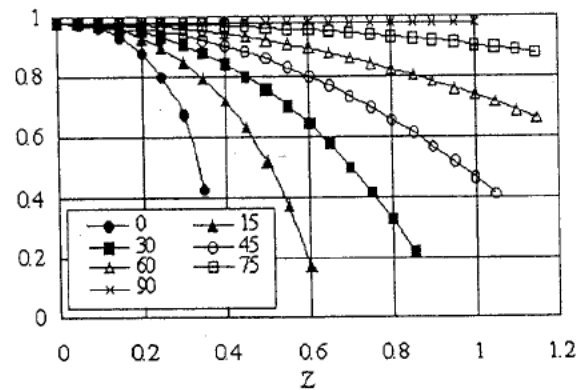
向と一致しているため、z位置の違いによる特性変化が無いのである。

図10は、アクチュエータ配置角を60(deg.)に固定した時、TIをX-Z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。



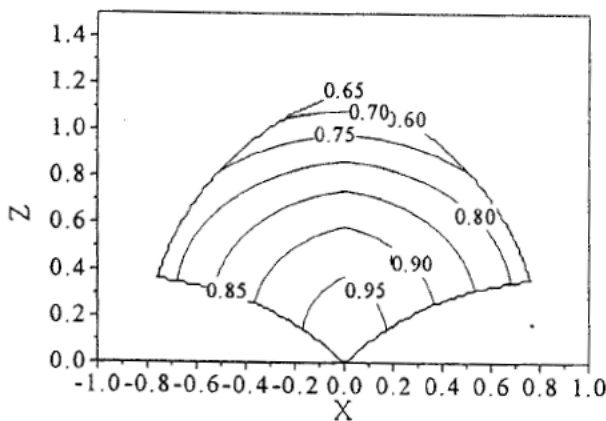
(x, y, |s|/|b|, l/|b|, offset angle)=(0, 0, 0.25, 1.25, 0)

図8 z位置の違いによる運動伝達指数変化



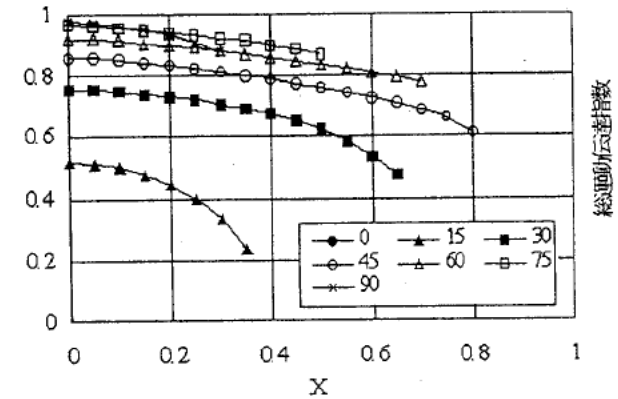
(y, z, |s|/|b|, l/|b|, offset angle)=(0, 0.5, 0.25, 1.25, 0)

図9 x位置の違いによる運動伝達指数変化



(θ, y, |s|/|b|, l/|b|, offset angle)=(60, 0, 0.25, 1.25, 0)

図10 x-z面における運動伝達指数分布



(x, y, |s|/|b|, l/|b|, offset angle)=(0, 0, 0.25, 1.25, 0)

図11 総運動伝達指数 (Total TI) 定義

5. 総運動伝達指数による評価

5. 1 総運動伝達指数 (Total TI)

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 TI) を考える。

具体的な計算方法は、まず手先を姿勢変化は与えない条件でx, y, zに走査し、逆運動学が成立する各点において、逐次運動伝達指数を計算し、これを合計した値を求める。次に一辺の長さがベース半径の立方体を単位体積とし、これで除してベース半径の違いを除く。本報では、この単位体積で正規化された値をTotal TI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、TI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TIの積と同義である。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とする。

$$Total TI = \text{Volume normalized } \int TI_{(x,y,z)} \cdot dv \quad (11)$$

5. 2 a₁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.)程度の際に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、手先で精度が劣化するため、その選択には注意が必要である。

5. 3 a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への影響が少ない。

5. 4 a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

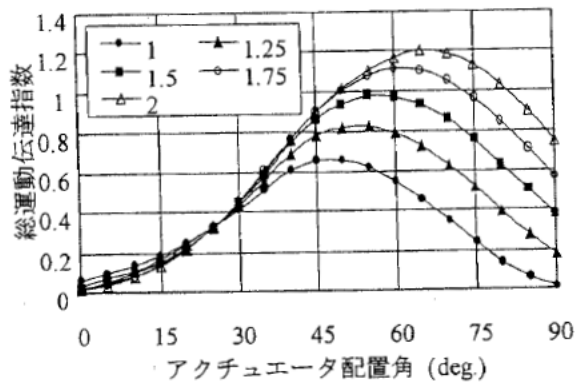


図12 連結ロッド長さを変えた時の総運動伝達指数変化

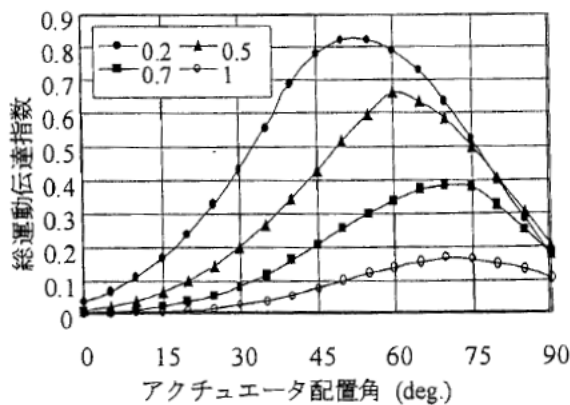


図13 手先プレート半径を変えた時の総運動伝達指数変化

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¹²⁾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。

5. 5 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と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。すなわち、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。

$$\text{Total TI (n)} = \text{Volume normalized } \Sigma (\text{TI}_{(xyz)})^n \cdot dV \quad (12)$$

図16は、連結ロッド長さ1.25, 手先半径0.25,

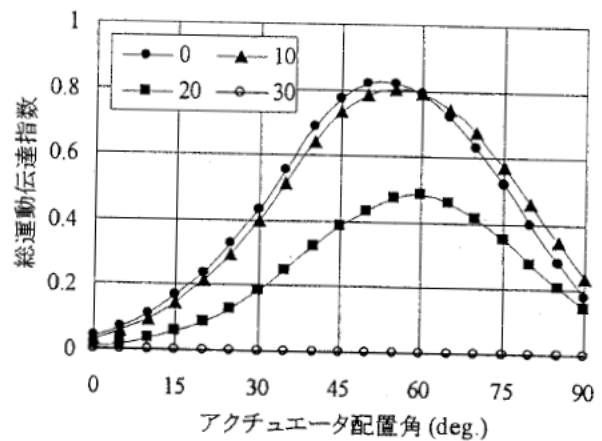


図14 オフセット角を変えた時の総運動伝達指数変化

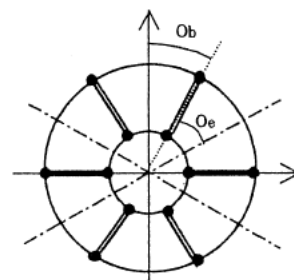


図15 オフセット角が30 (deg.) の時の特異点

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

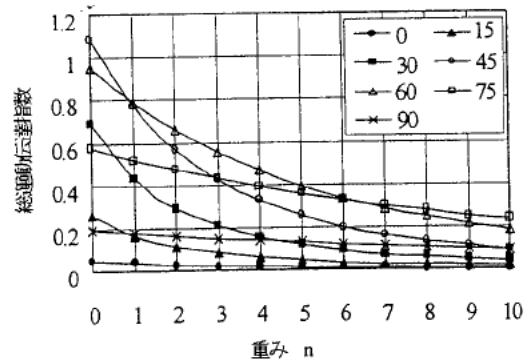
直動アクチュエータを放射状に配置した直動型パラレルメカニズムについて, アクチュエータ配置が出力特性に及ぼす影響を動作領域, 運動伝達指数 TI で評価した結果, 以下の知見を得た。

- (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, の手先 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, 45~75(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60~75(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。

参考文献

- 1) 増田峰知, 家城梯, 藤原基芳, 田畑康晴, 新井健生: “ベアリング組立事例におけるパラレルメカニズムの設計・製作”。三重県工業技術総合研究所報告. No.23, p.72-28(1999)
- 2) 新井健生, 谷川民生, J-P.Merlet, 千代友



($|s|/|b|, |l|/|b|, \text{offset angle}$) = (0.25, 1.25, 0)

図16 アクチュエータ配置角度別の
総運動伝達指数の重み

和: “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)

- 3) D. Stewart: “A platform with six Degrees of freedom”. Proc. Inst. Mec. Eng., 1, Vol.180, No.15, p.371-386(1965)
- 4) J-P.Merlet and C.Gosselin: “Nouvelle architecture pour un manipulateur parallele a six degresde liberte”. Mech. Mach. Theory (in French). Vol.26, No.1, p.77-90 (1991)
- 5) 橋本稔: “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) 増田峰知, 藤原基芳, 新井健生: “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)
- 8) 遠山退三: “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)
- 9) M. Honegger: “Nonlinear Adaptive Control of a 6 DOF Parallel Manipulator”. MOVIC '98. Vol.3, p.961-966(1998)
- 10) 新井健生: “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)
- 11) 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”。機械学会論文集C編. Vol.59, No.560, p.1142-1147(1993)
- 12) 杉本浩一: “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)