RSCR 空間四節リンク機構の運動特性解析*

渡辺 克巳^{*1}, 関根 武志^{*2}, 南後 淳^{*1}

Kinematic Analysis of RSCR Spatial Four-Link Mechanisms

Katsumi WATANABE, Takeshi SEKINE and Jun NANGO

The formulas for displacement and velocity analyses are derived for a spatial four-link mechanism with two revolute pairs, a spherical pair and a cylindrical pair. Then, a procedure for determining instantaneous screw axes is presented and their behaviors in the neighborhood of limit positions are clarified. The condition for limit positions of the driving-link motion is obtained on the basis of force transmission from the coupler link to the driven link and the determinant composed of the coefficients of simultaneous equation for velocity analysis. The conditional function is investigated geometrically and a quantity is proposed in order to evaluate motion and force transmission characteristics.

Key Words: Kinematics, Spatial Four-Link Mechanism, Instantaneous Screw Axis, Limit Position, Motion Transmissibility

1. 緒 言

空間四節リンク機構は簡潔な構造で複雑な運動を創成することができるので、生産ラインの組立や搬送機構および輸送機械の車輪支持機構などに応用されている。しかし構成部品が三次元空間で運動するため、特に、本論文で取扱う RSCR 空間四節リンク機構のように入出力関係が四次方程式である機構の場合には、運動学・力学解析が難しくなる。このため機構設計の系統的手法がまだ確立されていないのが現状である。

平面四節リンク機構をその特別な場合として含み、代表的空間四節リンク機構の一つである RSCR 空間四節リンク機構に関しては、舟橋と小川が円筒対偶の軸が従動節の回転軸と交わる場合の原動節の回転条件と圧力角について考察し⁽¹⁾、変位解析のための変換関数を提案している⁽²⁾。Tsai と Lee は Sutherland と Roth によって提案された伝達指数について検討を加えている⁽³⁾。また、Hunt は運動限界位置の定性的説明を与え⁽⁴⁾、舟橋らはその実用的解析手順を示している⁽⁵⁾。Thompson らおよび Ananthaswamy と

Kramer も機構総合に向けて変位・速度・加速度の解析式を導出しており⁽⁶⁾⁽⁷⁾、Shrivastava と Hunt は一時休止運動機構の設計手順を与え⁽⁸⁾、Balaji Rao と Lakshminarayana は従動節の揺動角の条件および伝達角による性能検定について報告した⁽⁹⁾。さらに Chiang らは四位置通過機構の総合条件について考察している⁽¹⁰⁾。

しかし、三次元運動機構の特性解析に有効である瞬間ねじ運動軸の利用、運動限界位置の条件式の検討および機構形状との関係、運動領域の識別、さらに一般的形状の場合の変位・速度解析式などについてはまだ発表されていないように思われる。

そこで本論文では、瞬間ねじ運動軸の相互関係と運動限界位置近傍での特性および角速度ベクトル算出への応用、中間節から従動節への力の伝達および速度解析式の分母の検討による運動限界位置の導出とその幾何学的解析について議論する。なお、変位解析の手順は既知なわけであるが、運動特性解析の基本であり、かつ展開される議論の各部に密接に関っているので記述することにする。

2. 運動学解析

2.1 機構定数および変数 静止節と原動節および

* 原稿受付 1996年7月22日。

^{*1} 正員、山形大学工学部 (〒992 米沢市城南 4-3-16)。^{*2} 学生員、山形大学大学院。

び従動節が回転対偶(R)で連結され、原動節と中間節が球面对偶(S)で、中間節と従動節が円筒対偶(C)で連結されている空間四節リンク機構(RSCR 四節リンク機構)の閉回路方程式を導く。

原動節と中間節の球面对偶の中心を B とし、点 B から原動節と静止節の回転対偶の軸へ下ろした垂線の足を A とする。点 B から中間節と従動節の円筒対偶の軸に下ろした垂線の足を H とする。従動節と中間節の円筒対偶の軸および従動節と静止節の回転対偶の軸の共通垂線がそれらの軸と交わる点をそれぞれ C および D とする。さらに静止節の二つの回転対偶の軸の共通垂線がそれらの軸と交わる点をそれぞれ E および F とする。

このとき、RSCR 四節リンク機構の機構定数は、原動節の長さ a_1 、中間節の長さ a_2 、従動節および静止節の長さ a_3 とねじれ角 (α_3, α_3) および (α_4, α_4) 、それに共通垂線 EF から対偶点 A および D までの距離 s_1 および s_4 の合計八つとなる。

対偶点 D を原点とし、従動節の回転軸を x 軸、点 D を通り原動節および従動節の回転軸の共通垂線に平行な直線を z 軸、それらと直交する軸を y 軸とする静止直交座標系を D-xyz とする。そして、隣接する二つのリンクの相対変位を図 1 に示すように、それぞれ $\theta_1, \theta_2, \xi_2, \theta_3, s_3$ および θ_4 で表す。

2.2 閉回路方程式 回転対偶および円筒対偶の軸の方向、向きを表す単位ベクトル $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_3, \mathbf{s}_4$ およびリンクの代表線分方向、向きを表す単位ベクトル $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$ は基本単位ベクトル $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ および $\mathbf{k}$ を用いて次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{s}_1 &= \cos \alpha_4 \mathbf{i} + \sin \alpha_4 \mathbf{j} \\ \mathbf{s}_3 &= \cos \alpha_3 \mathbf{i} - \sin \alpha_3 \cos \theta_4 \mathbf{j} + \sin \alpha_3 \sin \theta_4 \mathbf{k} \\ \mathbf{s}_4 &= \mathbf{i} \\ \mathbf{a}_1 &= \sin \alpha_4 \sin \theta_1 \mathbf{i} - \cos \alpha_4 \sin \theta_1 \mathbf{j} + \cos \theta_1 \mathbf{k} \\ \mathbf{a}_2 &= \sin \alpha_3 \sin \theta_3 \mathbf{i} \\ &\quad + (\cos \theta_3 \sin \theta_4 + \cos \alpha_3 \sin \theta_3 \cos \theta_4) \mathbf{j} \\ &\quad + (\cos \theta_3 \cos \theta_4 - \cos \alpha_3 \sin \theta_3 \sin \theta_4) \mathbf{k} \\ \mathbf{a}_3 &= \sin \theta_4 \mathbf{j} + \cos \theta_4 \mathbf{k} \\ \mathbf{a}_4 &= \mathbf{k} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

これらの単位ベクトルを用いると、球面对偶の中心 B の位置ベクトルは、閉ループ DFEABHCD 上の一つの点 D から他の点 B へ至る二とおりのベクトルの和として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{DB} &= s_4 \mathbf{s}_4 + a_4 \mathbf{a}_4 + s_1 \mathbf{s}_1 + a_1 \mathbf{a}_1 \\ &= a_3 \mathbf{a}_3 - s_3 \mathbf{s}_3 - a_2 \mathbf{a}_2 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

式(1)を式(2)に代入して得られる式の両辺の $\mathbf{i}, \mathbf{j}$

Fig. 1 RSCR spatial four-link mechanism

および $\mathbf{k}$ 成分を等置することにより、RSCR 四節リンク機構の閉回路方程式が次のように求まる。

$$-s_3 \cos \alpha_3 - a_2 \sin \alpha_3 \sin \theta_3 = x_B \dots\dots\dots (3)$$

$$a_3 \sin \theta_4 + s_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_4 - a_2 (\cos \theta_3 \sin \theta_4 + \cos \alpha_3 \sin \theta_3 \cos \theta_4) = y_B \dots\dots\dots (4)$$

$$a_3 \cos \theta_4 - s_3 \sin \alpha_3 \sin \theta_4 - a_2 (\cos \theta_3 \cos \theta_4 - \cos \alpha_3 \sin \theta_3 \sin \theta_4) = z_B \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 (x_B, y_B, z_B) は球面对偶の中心 B の座標であり、原動節角変位が与えられると既知量となる。

$$\left. \begin{aligned} x_B &= s_4 + s_1 \cos \alpha_4 + a_1 \sin \alpha_4 \sin \theta_1 \\ y_B &= s_1 \sin \alpha_4 - a_1 \cos \alpha_4 \sin \theta_1 \\ z_B &= a_4 + a_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

2.3 変位・速度解析式 原動節角変位 θ_1 の値が与えられると、閉回路方程式(3)～(5)は隣接する二つのリンクの相対変位 θ_3, s_3 および θ_4 に関する非線形の連立方程式となる。これらの式から θ_3 および s_3 を消去すると従動節角変位 θ_4 に関する条件式が次のように求まる。

$$\begin{aligned} & (y_B \sin \theta_4 + z_B \cos \theta_4 - a_3)^2 + \{x_B \sin \alpha_3 \\ & \quad + (y_B \cos \theta_4 - z_B \sin \theta_4) \cos \alpha_3\}^2 = a_2^2 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

式(7)は $t = \tan(\theta_4/2)$ の四次方程式に帰着させて解くことができる。

$$q_1 t^4 + q_2 t^3 + q_3 t^2 + q_4 t + q_5 = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ここで

$$\begin{aligned} q_1 &= p_1 - p_4 + p_6, \quad q_2 = -2(p_3 - p_5) \\ q_3 &= -2(p_1 - 2p_2 - p_6), \quad q_4 = 2(p_3 + p_5) \\ q_5 &= p_1 + p_4 + p_6 \\ p_1 &= y_B^2 \cos^2 \alpha_3 + z_B^2, \quad p_2 = y_B^2 + z_B^2 \cos^2 \alpha_3 \\ p_3 &= 2y_B z_B \sin^2 \alpha_3 \\ p_4 &= 2(x_B y_B \cos \alpha_3 \sin \alpha_3 - a_3 z_B) \\ p_5 &= -2(x_B z_B \cos \alpha_3 \sin \alpha_3 + a_3 y_B) \end{aligned}$$

Fig. 3 Example of instantaneous screw axes of the RSCR mechanism

$S_{42}(-S_{24})$ は、リンク 4, 1 および 2 に対して、またはリンク 4, 3 および 2 に対してケネデー・アーノルドの定理⁽¹¹⁾を適用することによって決定される。さらに、瞬間ねじ運動軸 S_{41} , S_{12} および S_{23} , S_{34} が既知の場合には、 S_{41} と S_{12} の共通垂線と、 S_{43} , S_{32} の共通垂線との共通垂線として求めることもできる。この手順は平面四節リンク機構の瞬間中心の作図による求め方に対応している。

リンク 3 に対するリンク 1 の瞬間ねじ運動軸 $S_{31}(-S_{13})$ も、 S_{42} の場合と同様に求められる。

RSCR 四節リンク機構の 6 本の瞬間ねじ運動軸の例を図 3 に示す。機構定数は次のとおりである。

$$a_1=5, a_2=3, a_3=5, a_4=-7$$

$$s_1=5, s_4=-5, \alpha_3=217^\circ, \alpha_4=350^\circ$$

ケネデー・アーノルドの定理を用いれば、瞬間ねじ運動軸の位置に加えて、相対角速度、相対並進速度も求めることができる。よって、 S_{24} と ω_{24} を求め、これらと S_{41} と ω_{41} から S_{12} と ω_{12} を求めれば、原動節に対する中間節の角速度の成分 $\dot{\xi}_2$, $\dot{\theta}_2$ および $\dot{\phi}_2$ の値は、 ω_{12} と単位ベクトル a_1 , $a_1 \times a_2 / \sin \theta_2$ および a_2 の内積を作ることによって算出することができる。

3. 運動限界位置

リンク機構において、一般に、原動節が一方向に運動することができなくなる位置を運動限界位置という。図 4 は揺動回転形平面四節リンク機構の運動限界位置である。さらに、変位解析が二次方程式および六次方程式に帰着されるステューブソン形平面六節リンク機構の運動限界位置の例をそれぞれ図 5(a),

Fig. 4 Limit positions of the rocker-crank mechanism

(a) Quadratic type

(b) Six order eq. type

Fig. 5 Limit positions of the planar six-link mechanism of Stephenson-type

(b) に示す。

運動限界位置は機構の運動領域の端点であり、その有無が原動節が 1 回転できるか否かに対応する。この特性は入出力関係の分類に応用することができる機構の重要な運動特性の一つである。

3.1 力の伝達からの検討 原動節と中間節は球面对偶で連結されているので、中間節を介して従動節を回転させるときに、中間節から従動節に作用する力は円筒対偶の中心線に垂直である。

中間節から従動節に作用する力を $F(\theta_i)$ とすれば、この力による従動節回転軸 FD まわりのモーメント

Fig. 6 Moment about the axis rotation of the driven link

$M(\theta_1)$ は、図 6 に従って解析することにより次式となる。

$$\begin{aligned} M(\theta_1) &= a_3 F(\theta_1) \cos \alpha_3^* \cos \theta_3^* \\ &+ s_3 F(\theta_1) \sin \alpha_3^* \sin \theta_3^* \\ &= -F(\theta_1) (a_3 \cos \alpha_3 \sin \theta_3 - s_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(20)の $M(\theta_1)$ が零の場合には、原動節がこの位置に接近した方向のトルクを回転軸に加えても、原動節はそれ以上回転することができないので、この位置は運動の限界位置である。よって、RSCR 四節リンク機構の運動限界位置は、条件：

$$a_3 \cos \alpha_3 \sin \theta_3 - s_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

が成立する位置である。

なお、 $F(\theta_1)=0$ となる位置は、従動節に作用する力の向きが反転する位置、すなわち従動節の揺動運動の端点である。

3・2 速度解析からの検討 原動節角変位に対する隣接する二つのリンクの相対角変位の微分係数 $\theta_4^{(1)}$ 、 $\theta_3^{(1)}$ および $s_3^{(1)}$ の算出式(13)～(15)には、

$$D(\theta_1) = a_2(a_3 \cos \alpha_3 \sin \theta_3 - s_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3) \quad \dots\dots\dots (22)$$

が共通分母として含まれている。

式(22)の右辺の()内の式は 3・1 節で求めた条件式(21)の左辺の式に一致しており、 $D(\theta_1)=0$ となる条件が運動限界位置の条件と等価であることがわかる。

$D(\theta_1)=0$ となる場合には隣接するリンクの相対角変位の微分係数 $\theta_4^{(1)}$ 、 $\theta_3^{(1)}$ および $s_3^{(1)}$ が同時に無限大となり、機構の入出力関係の曲線の接線の傾きが 90° または 270° となる。機構定数が一般的な値の機構の場合には、この位置は従動節角変位 θ_4 に対して原動

Fig. 7 RSCR mechanism with the general-form coupler link

節角変位が極値を取る位置(stationary configuration)⁽¹²⁾である。本論文は、RSCR 四節リンク機構の運動学上のこの特性を解析的に明らかにするものである。

3・3 中間節代表線分と従動節回転軸間の距離

中間節の代表線分 $\overline{BH}$ の方向、向きを表す単位ベクトル $\mathbf{a}_2$ がこの直線上に存在するときに、 $\mathbf{a}_2$ の静止直交座標系 $D-xyz$ の原点 D に関するモーメントを $\mathbf{\bar{a}}_2$ とすれば、代表線分 $\overline{BH}$ は単位二元ベクトルを用いて次のように表される。

$$\mathbf{\bar{a}}_2 = \mathbf{a}_2 + \varepsilon \mathbf{\bar{a}}_2 \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{\bar{a}}_2 &= -(a_3 \cos \alpha_3 \sin \theta_3 - s_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3) \mathbf{i} \\ &+ \{a_3 \sin \alpha_3 \sin \theta_3 \cos \theta_4 \\ &- s_3(\sin \theta_3 \sin \theta_4 - \cos \alpha_3 \cos \theta_3 \cos \theta_4)\} \mathbf{j} \\ &- \{a_3 \sin \alpha_3 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \\ &+ s_3(\sin \theta_3 \cos \theta_4 + \cos \alpha_3 \cos \theta_3 \sin \theta_4)\} \mathbf{k} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ただし、 ε は演算規則 $\varepsilon^n = 0$ ($n \geq 2$) を満たす単位である。

基本ベクトル $\mathbf{i}$ は二元部が零の単位二元ベクトルであるので、従動節回転軸(x 軸)と直線 BH の垂直距離 $d(\theta_1)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} d(\theta_1) &= \frac{|\mathbf{i} \cdot \mathbf{\bar{a}}_2|}{\sqrt{1 - (\mathbf{i} \cdot \mathbf{a}_2)^2}} \\ &= \frac{|a_3 \cos \alpha_3 \sin \theta_3 - s_3 \sin \alpha_3 \cos \theta_3|}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_3 \sin^2 \theta_3}} \quad \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

式(25)の右辺の分子の絶対値の記号 | | 内の式は、式(21)の左辺の式に一致している。よって、中間節の代表線分 $\overline{BH}$ が従動節回転軸 FD と交わることが運

も説明される。すなわち、直線 BH^* が xz' 平面と交わる点 P から x 軸に下ろした垂線の足を Q とすれば、線分 PQ の長さは次式で与えられる。

$$\overline{PQ} = a_3 - \frac{a_2 \cos \theta_3 + s_2 \sin a_2 \sin \theta_3}{a_2 \sin \theta_3 - s_2 \sin a_2 \cos \theta_3} \times (s_2 \cos a_3 + s_3) \tan a_3 \dots\dots\dots (37)$$

球面对偶の中心 B から円筒対偶の軸 CH に下ろした垂線が従動節の回転軸 FD と交わるのは、すなわち $\overline{PQ}=0$ となる条件は、

$$\cos a_3 (a_2 \sin \theta_3 - s_2 \sin a_2 \cos \theta_3) \neq 0 \dots\dots (38)$$

が成立する一般的な場合には、 $D(\theta_1)=0$ となる条件と同値である。

4. 解 析 例

節長、オフセットおよびねじれ角の値が、

$$a_1=7, \quad a_2=7, \quad a_3=1, \quad a_4=3$$

$$s_1=5, \quad s_4=-4, \quad a_3=60^\circ, \quad a_4=30^\circ$$

Fig. 9 Example of the relationship between the input and output angles

Fig. 10 Instantaneous screw axes of the RSCR mechanism at limit positions

である RSCR 四節リンク機構の入出力関係の曲線を図 9 に示す。

この機構は六つの運動限界位置をもち、それらの二つを上限、下限とする六つの運動領域が存在する。

$$[-157.619^\circ, 301.271^\circ], [-99.280^\circ, 156.333^\circ]$$

$$[-125.614^\circ, 111.940^\circ], [86.552^\circ, 154.265^\circ]$$

$$[-43.395^\circ, 121.225^\circ], [59.542^\circ, 317.492^\circ]$$

閉ループリンク機構は、原動節角変位 θ_1 がこれらの運動領域内の値を取る場合にのみ構成され、運動することができる。

原動節角変位 θ_1 の値が複数の運動領域に含まれる値である場合には、機構は複数とおり (例えば、 $\theta_1 = -60^\circ$ のときには二とおり、 $\theta_1 = 0^\circ$ のときには四とおり) 構成されるので、それらの識別が問題となる⁽¹³⁾。

RSCR 四節リンク機構の運動領域の識別については前報⁽¹⁵⁾で議論した。

図 10 は、2 番めの運動領域の上限および下限、すなわち運動限界位置における瞬間ねじ運動軸を示した図である。各リンクの相対変位は次のとおりである。

$$\theta_1 = -99.280^\circ, \quad \theta_2 = 146.203^\circ, \quad \theta_3 = 95.668^\circ$$

$$\theta_4 = 156.333^\circ, \quad \xi_2 = 26.305^\circ, \quad s_3 = -5.817$$

この図から、運動限界位置においては瞬間ねじ運動軸 S_{13} の方向が S_{43} の方向に、 S_{24} の方向が S_{12} の方向に一致することがわかる。このことは、瞬間ねじ運動軸の三次元空間内での位置を単位二元ベクトルを用い

Fig. 11 Behavior of instantaneous screw axes S_{13} relative to the driven link and S_{24} relative to the driving link

Fig. 12 Comparison of the denominator $D(\theta_1)$ with the distance $d(\theta_1)$

て解析しても確かめられる。

運動限界位置は隣接する二つの運動領域の共通点である。原動節を運動限界位置まで回転させ、そこから逆回転させるときに従動節を二つの運動領域にわたって運動させて、瞬間ねじ運動軸 S_{13} および S_{24} の運動限界位置の近傍 ($136^\circ \leq \theta_4 \leq 176^\circ$) での挙動を調べた。従動節に相対する S_{13} の挙動および原動節に相対する S_{24} の挙動を図 11 に示す。

従動節角変位 θ_4 の区間 $[136^\circ, 156.333^\circ]$ および $[156.333^\circ, 176^\circ]$ は原動節角変位 θ_1 の区間 $[-115.240^\circ, -99.280^\circ]$ および $[-99.280^\circ, -105.630^\circ]$ に対応する。よって運動限界位置の近傍において、瞬間ねじ運動軸 S_{24} は S_{12} に、そして S_{13} は S_{43} に急速に接近し、一致することになる。このことは瞬間ねじ運動軸を用いた運動限界位置の判定に利用できる。

図 12 は、運動限界位置の条件(21)の左辺の関数を共通因子としてもつ速度算出式の分母 $D(\theta_1)$ およびそれに対応させて表示するときの中間節代表線分と従動節回転軸の間の距離 $d(\theta_1)$ である。

機構の運動伝達特性は運動限界位置の近傍では悪くなる⁽¹⁴⁾。よって、力の伝達および速度解析の検討から運動限界位置を決定したときに用いた関数と類似の変化特性を示す 2 直線間の距離 $d(\theta_1)$ は、機構の運動伝達性を評価する量の基礎として有用である。

5. 結 言

(1) 一般的形状の場合の RSCR 空間リンク機構の隣接する二つのリンクの変位・速度解析式を与えた。さらに、静止節に対する中間節の瞬間ねじ運動軸の位置は、ケネデー・アーノルドの定理を適用するこ

とにより、三とおりの手順で決定できること、その結果、相対角変位の微分係数を用いなくて角速度ベクトルを算出できることを示した。

(2) この機構の原動節の運動限界位置の条件を力の伝達および速度解析から検討し、簡潔な条件式を導出した。さらにこの条件は、球面对偶の中心から円筒対偶の軸へ下ろした垂線が従動節の回転軸と交わることであることを一般的に示した。

(3) 球面对偶の中心から円筒対偶の軸へ下ろした垂線と従動節の回転軸の間の距離は、従動節回転軸まわりのモーメントおよび速度算出式の分母と共通因子を持ち、運動限界位置の近傍ではそれらと類似の変化特性を示すので、運動伝達性を評価する量の基礎として有用である。

文 献

- (1) 舟橋宏明・小川潔, 空間 4 節機構における原動節の回転条件と圧力角について, 機論, **34**-262(1968), 1151-1158.
- (2) 舟橋宏明・小川潔・原利行, 空間 4 節機構の変位解析, 機論, **44**-378(1978), 670-678.
- (3) Tsai, M. J. and Lee, H. W., The Transmissivity and Manipulability of Spatial Mechanisms, *ASME, J. Mech. Des.*, **116**(1994), 137-143.
- (4) Hunt, K. H., *Kinematic Geometry of Mechanisms*, (1978), 386, Clarendon Press, (Oxford).
- (5) 小川潔・舟橋宏明・早川脩, 空間 4 節機構における原動節の回転条件について, 機論, **33**-249(1967), 832-841.
- (6) Thompson, L. M., Reinholtz, C. F. and Myklebust, A., Exact Analysis and Synthesis of the RSCR Spatial Mechanism, *Trends Devel. Mech. Mach. Robot.*, **15** (1988), 471-478.
- (7) Ananthasuresh, G. K. and Kramer, S. N., Analysis and Optimal Synthesis the RSCR Spatial Mechanism, *Trans. ASME, J. Mech. Des.*, **116**(1994), 174-181.
- (8) Shrivastava, A. K. and Hunt, K. H., Dwell Motion from Spatial Linkages, *ASME, J. Eng. Ind.*, **95**(1973), 511-518.
- (9) Balaji Rao, L. V. and Lakshminarayana, K., Studies on the Spatial Synthesis of RSCR Crank-Rocker Mechanism, *Proc. 6th World Cong. on Theory of Mech.*, (1983), 317-320.
- (10) Chiang, C. H., Chieng, W. H. and Hoeltzel, D. A., Synthesis of the RSCR Mechanism for Four Precision Positions with Relaxed Specifications, *Mech. Mach. Theory*, **27**(1992), 157-167.
- (11) Beggs, J. S., *Advanced mechanism*, (1966), 55, Macmillan Company.
- (12) 文献(4)の 37 ページ.
- (13) 渡辺克巳・黄宗益・河合靖宏, スティーブソン形平面 6 節リンク機構の変位解析, 機論, **52**-482, C(1986), 2688-2695.
- (14) 渡辺克巳・舟橋宏明, スティーブソン形平面 6 節リンク機構の運動特性(第 2 報, 運動伝達性の評価), 機論, **50**-452, C(1984), 662-669.
- (15) 渡辺克巳・関根武志・南後淳, RSCR 空間四節リンク機構の運動領域識別, 機論, **63**-610, C(1997), 2151-2158.