最小層数を満足する搬送機構の総合*

坂本 吉弘^{*1}, 小川 潔^{*2}

Synthesis of Conveying Machine Satisfying Minimum Number of Layers

Yoshihiro SAKAMOTO and Kiyoshi OGAWA

In the design of a planar conveying machine, individual links must be arranged separately on parallel planes, which are called layers in this paper, to avoid mutual interference among moving links during a cycle of motion. In the present study regarding a planar 6-link conveying machine, conditions which determine the minimum number of layers required for constructing the conveying machine are formulated. Moreover, in order to determine the optimum profiles of links which satisfy the minimum number of layers to avoid mutual interference among moving links, relative loci of pairing points and positions of links on the same layer during a cycle of motion are analyzed. Based on the results of analysis the planar 6-link conveying machine satisfying minimum number of layers is synthesized.

Key Words: Mechanism, CAD, Interference of Moving Links, Loci of Pairing Point, Profile of Link, Minimum Moving Space

1. 緒 言

平面多節機構を搬送機構に適用する場合、各節の配置される運動平面の増加を抑制して機構の運動占有空間をなるべく小さい領域に縮小し、小形化ならびに軽量化された機構の総合が行われなければならない⁽¹⁾。

一般に、機構を構成する各節の運動平面が増加すれば、それに伴い搬送機構の創成点における運動平面外への変位すなわち節直角方向の変位が増大⁽²⁾し、これが搬送機構の入出力精度の著しい低下を招き、その解決が重要な問題の一つとなっている。著者らは先に平面多節機構の自動搬送機構への適用例として、Z字形搬送径路を満足する搬送機構⁽⁴⁾について述べた。しかし、そこでは、各節の配置される運動平面は試行錯誤によって決定していたために機構の運動占有空間が増大し、小形化ならびに軽量化された搬送機構を実現することは困難であった。

そこで本報では、層配置が考慮されていなかった平

面6節搬送機構⁽⁴⁾について、まず、配置される各節および対偶の層数を減少させるために層配置の総合を行い、搬送機構の最小層数を求める。次に、上述の総合結果に基づき最小層数を満足する節形状を具体的に決定するために、相対運動に基づく各節上の対偶の変位を変換関数⁽³⁾によって簡潔に表し、これを用いて同層上に存在する機構要素すなわち節および対偶の干渉の有無をグラフィック・ディスプレイによって判断し、各節の運動平面の増加を抑制して最小の運動占有空間を有する節形状を決定して小形化された搬送機構を実現する。

2. 搬送機構の層配置

2・1 搬送機構のインシデンス・マトリックス 回対偶からなるZ字形搬送径路 $P_A \rightarrow P_B \rightarrow P_C \rightarrow P_D$ および $P_D \rightarrow P_C \rightarrow P_B \rightarrow P_A$ を満足するように総合された平面6節搬送機構は図1に示される。すなわち、動節 L_2 の運動によって始点 P_A の搬送物を把持して区間 P_AP_B では水平方向に、区間 P_BP_C では上方方向に、さらに区間 P_CP_D では水平方向に搬送し、終点 P_D で搬送物を離脱後、往路と同じ径路を辿って点 P_A に帰着するように総合されている。なお、図2中の $l_1, l_2, \dots, l_{63}$ は節 $L_1, L_2, \dots, L_6$ の長さを無次元量として表したも

* 1996年7月18日 九州支部夏期講演会において講演、原稿受付 1996年8月2日。

^{*1} 正員、武蔵工業大学工学部 (〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)。

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

$$\begin{aligned}
 l_{11} &= 0.88218, \quad l_{12} = 0.22723, \quad l_{31} = 1.07353, \\
 l_{32} &= 0.77518, \quad l_{33} = 0.45665, \quad l_{41} = l_{42} = 1.0, \\
 l_{51} &= 0.26007, \quad l_{61} = 1.27238, \quad l_{62} = 1.0, \\
 l_{63} &= 0.27457, \quad \alpha = 118.98^\circ, \quad \beta = 6.4127^\circ
 \end{aligned}$$

Fig.1 Planar 6-link conveying machine

のである。この搬送機構を構成する各節の連結状態を示すインシデンス・マトリックスは式(1)によって示される。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、マトリックス中の成分は左からおよび上から順に節 $L_1, L_2, \dots, L_6$ に対応し、 L_i と L_j ($i, j=1, 2, \dots, 6, i \neq j$) が互いに連結される場合には1、連結されない場合には0となる。次に、節 $L_1, L_2, \dots, L_6$ が配置される層の番号を $P_1, P_2, \dots, P_6$ として表せば、節 L_i ($i=1, 2, \dots, 6$) が配置される層は表1に示され、この搬送機構の層数は $p=5$ として求められる。

2・2 搬送機構の最小層数 搬送機構を構成する各節が平行平面上に配置される層数を減少させるためには、まず、原動節が $\theta=360^\circ$ 以上運動するものとして、機構の組立に最低限必要な層数すなわち最小層数 $p_{\min}$ を求めなければならない。いま、機構中の任意の三つの節 L_h, L_i および L_j ($h, i, j=1, 2, \dots, n, h \leq i \leq$

Table 1 Layer arrangements of planar 6-link conveying machine

Layer arrangement					
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
1	2	3	4	5	1

j) において、これらの節を互いに連結する対偶 J_{hi} および J_{ij} が回転するための制約条件は

$$P_h \leq P_i \leq P_j \quad (\text{複号同順}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

として表される。次に機構の層数を p_n 、層を要素とする集合を $S_A = \{1, 2, \dots, p_n\}$ 、節 L_k ($k=2, 3, \dots, n$) を配置することのできない層の集合を $S_{Bk} = \{p_m | 1 \leq m \leq k, m \text{ は } M(k, m)=1 \text{ を満たす整数}\}$ とすれば、節 L_k は集合

$$S_{ck} = S_A \cap S_{Bk}^c \quad \dots\dots\dots (3)$$

のいずれかに配置することができる。ここで、 S_{Bk}^c は S_{Bk} の補集合を表し、機構の最小層数 $p_{\min}$ は $S_{ck} \neq \phi$ (ϕ : 空集合) を満足する p_n の最小値となる。ただし $k=1$ に対して $P_1=1$ および $p_1=1$ とおく。

いま、図1に示す搬送機構の最小層数を求めるために、式(1)~(3)を適用して、各節が配置される層を求める。すなわち、

$k=2$ に対して

$$S_{c2} = \{1\} \cap \{2, 3, \dots\} = \phi$$

$$\text{したがって } P_2=2, \quad p_2=2$$

$k=3$ に対して

$$\text{式(2)の制約条件を適用して}$$

$$P_3=3, \quad p_3=3$$

$k=4$ に対して

$$S_{c4} = \{1, 2, 3\} \cap \{2, 4, \dots\} = \{2\}$$

$$\text{したがって } P_4=2, \quad p_4=3$$

$k=5$ に対して

$$S_{c5} = \{1, 2, 3\} \cap \{1, 2, 4, \dots\}$$

$$= \{1, 2\}, \quad \text{したがって } P_5=1, \quad p_5=3$$

$k=6$ に対して

$$S_{c6} = \{1, 2, 3\} \cap \{3, 4, \dots\} = \{3\}$$

$$\text{したがって } P_6=3, \quad p_6=3$$

となる。上述の結果により、この搬送機構の最小層数は $p_{\min}=3$ として求めることができる。

3. 搬送機構の変位解析

2章で述べた搬送機構の一周期運動中における要素間干渉を回避した最小層数を満足する節形状を決定するために、図1に示す搬送機構中の各対偶点の変

位を求める。いま図1中の静止節 L_1 上の対偶点 J_{41} を原点 O とし、 L_1 の対偶軸中心を結ぶ線分 $\overline{J_{41}J_{12}}$ に重なる軸を X 、軸 X に直交する軸を Y として静止直交座標系 $O-XY$ を節 L_1 上に固定すれば、各節上の対偶点の座標 $J_{ij}=J_{ij}(X_{ij}, Y_{ij})$ は図2,3のように表すことができる。同様に、図2中の節 L_3 上の対偶点 J_{35} を原点 o とし、対偶軸中心線 $\overline{J_{23}J_{35}}$ に重なる軸を x 、軸 x に直交する軸を y として動座標系 $o-xy$ を節 L_3 上に固定すれば、この座標系における節 L_6 上の対偶点 J_{56} の座標 $J_{56}(x_{56}, y_{56})$ および創成点 P の座標 $P(x_p, y_p)$ は図4に示される。上記の座標系における各節上の対偶点の変位を変換関数 F_i によって表せば次式が得られる。すなわち

座標 $J_{23}=J_{23}(X_{23}, Y_{23})$ を与える変換関数 F_1 は

$$X_{23}=l_1+l_2 \cos \theta$$

Fig. 2 Coordinates of pair on stationary coordinate system

Fig. 3 Coordinates of pair on link L_3

$$Y_{23}=l_2 \sin \theta \dots\dots\dots (4)$$

座標 $J_{34}=J_{34}(X_{34}, Y_{34})$ を与える変換関数 F_2, F_3 および F_4 は

F_2 ;

$$\cos \theta_1 = \frac{X_{23}^2 + Y_{23}^2 - l_{33}^2 - l_{41}^2}{2 l_{33} l_{41}}$$

$$\sin \theta_1 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}$$

F_3 ;

$$\cos \theta_2 = \frac{l_{33} Y_{23} \sin \theta_1 - (l_{41} + l_{33} \cos \theta_1) X_{23}}{X_{23}^2 + Y_{23}^2}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{l_{33} Y_{23} \sin \theta_1 - (l_{41} + l_{33} \cos \theta_1) Y_{23}}{X_{23}^2 + Y_{23}^2}$$

F_4 ;

$$X_{34} = -l_{41} \cos \theta_2$$

$$Y_{34} = l_{41} \sin \theta_2$$

$\dots\dots\dots (5)$

座標 $J_{46}=J_{46}(X_{46}, Y_{46})$ を与える変換関数 F_5 は

$$X_{46} = -(l_{41} + l_{42}) \cos \theta_2$$

$$Y_{46} = (l_{41} + l_{42}) \sin \theta_2$$

$\dots\dots\dots (6)$

座標 $J_{35}=J_{35}(X_{35}, Y_{35})$ を与える変換関数 F_6 は

$$\begin{aligned} X_{35} = & -l_{41} \cos \theta_2 - l_{32} (\cos \theta_2 \cos \theta_1 \cos \alpha \\ & + \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \alpha - \sin \theta_2 \sin \theta_1 \cos \alpha \\ & + \sin \theta_2 \cos \theta_1 \sin \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{35} = & l_{41} \sin \theta_2 + l_{32} (\sin \theta_2 \cos \theta_1 \cos \alpha \\ & + \sin \theta_2 \sin \theta_1 \sin \alpha - \cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \alpha \\ & + \cos \theta_2 \cos \theta_1 \sin \alpha) \end{aligned}$$

$\dots\dots\dots (7)$

座標 $J_{56}=J_{56}(X_{56}, Y_{56})$ を与える変換関数 $F_7, F_8, F_9,$

F_{10}, F_{11}, F_{12} は

F_7 ;

$$\cos \theta_5 = \frac{X_{23} - X_{35}}{\sqrt{(X_{23} - X_{35})^2 + (Y_{23} - Y_{35})^2}}$$

Fig. 4 Coordinates of pair on moving coordinate system

$$\sin \theta_5 = \frac{Y_{23} - Y_{35}}{\sqrt{(X_{23} - X_{35})^2 + (Y_{23} - Y_{35})^2}}$$

F_8 ;

$$x_{46} = (X_{46} - X_{35}) \cos \theta_5 + (Y_{46} - Y_{35}) \sin \theta_5$$

$$y_{46} = (X_{46} - X_{35}) \sin \theta_5 + (Y_{46} - Y_{35}) \cos \theta_5$$

F_9 ;

$$\cos \theta_3 = \frac{x_{46}^2 + y_{46}^2 - l_5^2 - l_{62}^2}{2 l_5 l_{62}}$$

$$\sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}$$

F_{10} ;

$$\cos \theta_4 = \frac{l_{62} y_{46} \sin \theta_3 - (l_5 + l_{62} \cos \theta_3) x_{46}}{x_{46}^2 + y_{46}^2}$$

$$\sin \theta_4 = \frac{l_{62} x_{46} \sin \theta_3 + (l_5 + l_{62} \cos \theta_3) y_{46}}{x_{46}^2 + y_{46}^2}$$

F_{11} ;

$$x_{56} = -l_5 \cos \theta_4$$

$$y_{56} = l_5 \sin \theta_4$$

F_{12} ;

$$X_{56} = X_{35} + x_{56} \cos \theta_5 - y_{56} \sin \theta_5$$

$$Y_{56} = Y_{35} + x_{56} \sin \theta_5 + y_{56} \cos \theta_5$$

..... (8)

創成点 $P = P(X_p, Y_p)$ を与える変換関数 F_{13} および

F_{14} は

F_{13} ;

$$\begin{aligned} x_p = & -l_5 \cos \theta_4 - l_{63} (\cos \theta_4 \cos \theta_3 \cos \beta \\ & - \cos \theta_4 \sin \theta_3 \sin \beta - \sin \theta_4 \sin \theta_3 \cos \beta \\ & - \sin \theta_4 \cos \theta_3 \sin \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_p = & l_5 \sin \theta_4 + l_{63} (\sin \theta_4 \cos \theta_3 \cos \beta \\ & - \sin \theta_4 \sin \theta_3 \sin \beta + \cos \theta_4 \sin \theta_3 \cos \beta) \end{aligned}$$

$$+ \cos \theta_4 \cos \theta_3 \sin \beta)$$

F_{14} ;

$$X_p = X_{23} + x_p \cos \theta_5 - y_p \sin \theta_5$$

$$Y_p = Y_{23} + x_p \sin \theta_5 + y_p \cos \theta_5$$

..... (9)

としてそれぞれ表すことができる。

以上に示した変換関数 $F_1, F_2, \dots, F_{14}$ を適用して搬送機構に対する変位解析のためのブロック線図を求めれば図5に示され、これによって機構中の任意の節に対する相対位置が明らかとなる。

4. 要素間干渉を考慮した搬送機構の総合

3章の解析結果に基づき、同層上に配置された各節の相対運動に伴う要素間干渉を回避した節形状を求める。いま、図2に示す搬送機構において、原動節 L_2 が 360° 回転する間の各対偶の相対運動軌跡および節の相対位置を、図5に示すブロック線図を平面機構の層配置システム⁽³⁾に用いてグラフィック・ディスプレイ上に出力し、同層上に配置された各対偶および節間の干渉の有無を判断する。図6は節 L_2 に対する層 $P_2=2$ と同層上の対偶 $J_{34}, J_{35}, J_{41}, J_{46}, J_{56}$ の相対軌跡を、図7は節 L_5 に対する層 $P_5=2$ と同層上の対偶 $J_{12}, J_{23}, J_{34}, J_{41}, J_{46}$ の相対運動軌跡をグラフィック・ディスプレイによって示したものである。図6,7に示されるように、各節上に配置された対偶は機構の一周期運動中に複雑な相対運動軌跡を描き、この場合はいずれの対偶も同層上に配置された各節に対して干渉を生じないことがわかる。同様に図8は節 L_4 に対する $P_4=2$ と同層上の節 L_2 および L_5 の相対位置を示したものである。この結果、節 L_5 は節 L_4 の一部分 $\overline{J_{34}J_{46}}$ 上で干渉を生じていることがわかる。さらに図9は干渉を生じる節 L_4 および L_5 について、同層内で節 L_5 との干渉を回避するために、節 L_4 の形状 $\overline{J_{41}J_{34}J_{46}}$ が $\overline{J_{41}J_{34}ABCDJ_{46}}$ のように変更されている状態が示されている。

次に図10(a), (b)は、図9に示される層2上に配置された要素間干渉を回避した後の節 $\overline{J_{41}J_{34}ABCDJ_{46}}$ と同層上に存在する節 L_2 および L_5 との相対位置を示したものである。この結果、節 $\overline{J_{41}J_{34}ABCDJ_{46}}$ は機構の一周期運動中に節 L_2 および L_5 と干渉を生じないことがわかる。同様にして同層上に配置された他の動節についても要素間干渉の有無をチェックし、適切な節形状を求める。以上の結果により、この搬送機構の各節が配置される最適層配置は表2に示され、最小層数は3として求められる。ここで表2の層配置を満足する搬送機構をグラフィック・ディスプレイ上に

Fig. 5 Block diagram for analysis of displacement of conveying machine

Fig. 6 Loci of pairs on layer 2 relative to link L_2 Fig. 7 Loci of pairs on layer 2 relative to link L_5 Fig. 8 Relative locations of link L_2 and L_5 on the same layer as link L_4

力すれば図 11 に示される。この結果は表 1 に示される総合前の機構の層数 5 を大幅に減少するもので、小形化された最小の運動占有空間を有する搬送機構が実現されたことを示している。

Fig. 9 Profile of link L_4 avoided interference between link L_4 and L_5 Fig. 10 Relative locations of link L_4 and L_5 on the same layer as link L_2

5. 結 言

Z 字形搬送径路を満足する平面 6 節搬送機構について、最小層数に基づく機構要素の層配置を行い、次の結論を得た。

Table 2 Optimum layer arrangements of planar 6-link conveying machine

Layer arrangement					
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
1	2	3	2	2	1

Fig. 11 Profiles of link on display

(1) 搬送機構の層配置において、原動節が一周期の運動を行うものとして機構の組立可能な条件および対偶の回転可能な条件を示し、搬送機構を構成する各節の配置される層を理論的に求め、機構の最小層数を

決定した。

(2) 搬送機構の一周期運動中における各節上の対偶の変位を変換関数によって簡潔に表し、これを用いて要素間干渉の有無の判断を容易に把握できるようになり、したがって要素間干渉を回避した最小層数を満足する節形状の決定を可能にした。

(3) 上述の結果に基づき同層上に配置された各要素間の干渉の有無をグラフィック・ディスプレイによって判断し、動節の運動平面の増加を抑制して最小の運動占有空間を有する節形状を決定した。

(4) 搬送機構を構成する各節および対偶の配置される層数を減少させることが可能になり、さらに最小層数を満足する節形状を適切に決定することによって、これを考慮しない従来の搬送機構に比べて機構の運動占有空間が著しく縮小化され、かつ小形化された搬送機構が実現された。

文 献

- (1) 坂本吉弘・小川潔・下嶋浩・佐藤治・梶川薫, 可調整搬送機の動特性の解析, 機論, 52-481, C (1986), 2525-2531.
- (2) 坂本吉弘・舟橋宏明・堀江三喜男・小川潔・赤塚崇雄, 動節の層配置を考慮した平面機構の動的解析, 機論, 56-523, C (1990), 687-692.
- (3) 坂本吉弘・舟橋宏明・小川潔, 平面機構の層配置システム, 機論, 54-500, C (1988), 1009-1016.
- (4) 下嶋浩・小川潔・山路哲平, 中間節の姿勢を考慮した平面6節機構の総合, 機論, 39-321 (1973), 1645-1654.