要求動作の変化に対するリー代数に基づく機構構造の再構成*

徳永仁史** 松木則夫** 今村 聡** 田中文基*** 岸浪建史***

Reconfiguration of Kinematic Structure Based on Lie Algebra for Changing Motion Requirement

Hitoshi TOKUNAGA, Norio MATSUKI, Satoshi IMAMURA, Fumiki TANAKA and Takeshi KISHINAMI

This paper presents a new method for adapting the existing manufacturing system for a requirement change, such as the change of a required motion task, by modifying its kinematic structure from the viewpoint of the degrees of freedom of the end effector of the mechanism. In a previous report, the authors formulated the kinematic structure and motion task using Lie algebra. In this report, using these representations and their inclusion relations, the authors propose a method for evaluating the reusability of a kinematic structure for a newly specified motion task, and then propose a method for reconfiguring the mechanism in Lie algebra according to the result of the reusability evaluation. Finally, in order to evaluate the usefulness of the proposed method, it is applied to a kinematic design example of a mechanism.

Key words: kinematic synthesis of mechanisms, Lie algebra, reusability evaluation, reconfiguration of mechanism

1. はじめに

予測困難な市場の変化、要求の変化に製造システムは対応しなければならない。しかし、製造システムの再設計・再立ち上げに要する多大な時間及びコストが、製品の開発・製造におけるボトルネックとなる場合が多い。このような課題に対して、製造システムの改造¹⁾や、構成変更が可能な製造システムの提案が行われている²⁾。後者に関しては、その設計を支援する手法が提案されている³⁾⁻⁷⁾が、既存の製造システムに対しては、機構の解析手法と要求作業に適応するための機構変更手法が確立されていないため、既存の製造システムを有効に再利用することが難しい。従って、本研究では、既存の製造システムに対する機構の解析を可能とし、要求作業が実行可能となるようにその機構構造を変更する方法の提示を可能とするために、機構学的及び数学的な観点からの解析・設計手法を提案する。

2. リー代数に基づく機構構造の再構成システム

著者らは、これまでに、リー代数⁸⁾に基づく機構構造及び作業動作の表現方法を提案し、図1(a)に示すように、指定された作業動作を実行可能な機構構造を導出する方法を提案してきた⁹⁾。リー代数を用いることにより、機構構造と作業動作とを自由度という観点から統一的に表現でき、それらの関係を直接的に表現できることから、相互に関連する設計支援が容易になる。そこで本研究では、前報で提案したリー代数に基づく機構構造および作業動作の表現方法に基づき、要求作業に対し既存の機構構造の変更案を提示する図1に示すような設計支援システムの構築のために、以下のことを行う。

- (1) 新たに指定された作業動作に対し、既に存在する機構構造の再使用可能性を判定する方法を提案する (図1(b))。
- (2) (1)の判定結果に基づき、機構構造の再構成案を提示する方法を提案する (図1(c))。
- (3) 具体例への適用により、提案方法の有効性を確認する。

3. リー代数に基づく機構構造と作業動作の表現

本研究で用いる機構構造表現、作業動作表現⁹⁾(図1のLie algebraで示した領域における表現)について簡単に説明する。剛体間の相対的位置姿勢を表現する同次変換行列の集合 $SE(3)$ は、行列の指数写像(exp, log)を用いてリー代数 $se(3)$ に対応させることができる¹⁰⁾。リー代数 $se(3)$ は標準基底 $L_1 \cdots L_6$ (L_1, L_2, L_3 : x, y, z 方向並進の基底, L_4, L_5, L_6 : x, y, z 軸回転の基底)により定義でき、表1に示す12種類の部分代数のタイプが定義できる。本研究では、これら部分代数(または、基底)により、剛体間の自由度を表現している。一般に機構構造は同次変換行列を用いて定義できる。本研究では、機構構造を、対応する(エンドエフェクタの自由度を表現する)部分代数を用いて、式(1)のように表現する。

$$h = \{t_1 L'_1 + t_2 L'_2 + \cdots + t_n L'_n | t_1, t_2, \dots, t_n \in \mathbb{R}\} \quad (1)$$

ここで、 L'_i は基底 $L_1 \cdots L_6$ の線形結合で表現され、機構構造における個々の自由度を表現している。

表1の右側には、各部分代数のタイプに対応する機構構造の例の一部を示している。本研究で開発する図1の機構モジュールデータベース (Module DB) には、機構モジュールをこれら12種類のタイプに分類し格納する。一方、作業動作 (正確に

Fig.1 Mechanism reconfiguration process in Lie algebra

* 原稿受付 平成15年1月21日
 ** 正会員 産業技術総合研究所 (つくば市並木1-2)
 *** 正会員 北海道大学大学院工学研究科 (札幌市北区北13条西8丁目)

Table 1 Subalgebra types and examples of corresponding modules

DOF	Notation	Elements of subgroup	Basis of Lie algebra	Lower pair	Mechanism (module) examples
0	Fixed	I (identity matrix)		Fixed	end effector spindle
1	T_v	$Trans(x, 0, 0)$	L_1	Prismatic	
	R_u	$R_x(\phi)$	L_4	Revolute	
	$H_{u,p}$	$Trans(x, 0, 0)R_x(px)$	$L_1^{1+p}L_4$ (p : constant)	Helical	
2	T_p	$Trans(0, y, z)$	L_2, L_3		
	C_u	$Trans(x, 0, 0)R_x(\phi)$	L_1, L_4	Cylindrical	
3	T	$Trans(x, y, z)$	L_1, L_2, L_3		
	G_p	$Trans(0, y, z)R_x(\phi)$	L_2, L_3, L_4	Planar	
	S_o	$R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)$	L_4, L_5, L_6	Spherical	
	$Y_{u,p}$	$Trans(x, y, z)R_x(px)$	$L_1^{1+p}L_4, L_2, L_3$		
4	X_v	$Trans(x, y, z)R_x(\phi)$	L_1, L_2, L_3, L_4		
6	Free	$Trans(x, y, z) \cdot R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)$	$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$		

は、作業動作を特徴付ける自由度)はその作業動作を実行可能な機構構造を表現する部分代数により、同様に表現できる。

表1に示した任意のタイプのリー代数間には包含関係が存在する。表2はリー代数の基底に注目し、包含関係を導出したものである。表中の○は、リー代数 A, B 間の関係 $A \supseteq B$ 、すなわち、 B が A の部分代数であることを示している。

4. リー代数に基づく機構構造の再使用可能性判定

はじめに、新たに指定された作業動作に対し、既に存在する機構構造の再使用可能性を判定する方法を提案する。新たに指定された作業動作が、既に存在する機構構造で実現できるかどうかは、前者を特徴付ける自由度を、後者の自由度が含んでいるかによって判定することができる。リー代数は、自由度と1対1の対応関係があるため、自由度間に包含関係がある場合、対応するリー代数間にも包含関係が存在し、その逆も成り立つ。従って、既に存在する機構構造の再使用可能性は、リー代数の包含関係を用いて判定することができる。

既存の機構構造 $MECH$ に対して新たに作業動作 $TASK$ が指定されたと仮定し、図2に示すように、それらのリー代数をそれぞれ h_{MECH} 、 h_{TASK} とする。 h_{MECH} と h_{TASK} の包含関係をチェックし、機構構造の再使用可能性を判定する。 h_{MECH} と h_{TASK} の関係には次の場合が考えられる。

(1) $h_{MECH} \supseteq h_{TASK}$

機構構造は作業動作を特徴付けるすべての自由度を含んでいる。すなわち、機構構造をそのまま再使用し、作業動作を実行できる。また、 $h_{MECH} \supseteq h_{TASK}$ を満たす条件下で、作業動作

Table 2 Inclusion relations

A \ B	Fixed	T_v	R_u	$H_{u,p}$	T_p	C_u	T	G_p	S_o	$Y_{u,p}$	X_v	Free
Fixed	○											
T_v	○	○										
R_u	○		○									
$H_{u,p}$	○			○				○: $A \supseteq B$				
T_p	○	○			○							
C_u	○	○	○	○		○						
T	○	○			○		○					
G_p	○	○	○		○			○				
S_o	○		○						○			
$Y_{u,p}$	○	○		○	○					○		
X_v	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	
Free	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Fig.2 Mapping existing mechanism and specified task into Lie algebra

に不必要な機構構造の部分を削除することができる。

(2) $h_{MECH} \not\supseteq h_{TASK}$

図3に示すように積集合 $h_{MECH} \cap h_{TASK}$ を導出することにより、機構構造は、作業動作を特徴付ける一部の自由度を含んでいる場合 ($h_{MECH} \cap h_{TASK} \neq \{0\}$ の場合) と、全く含んでいない場合 ($h_{MECH} \cap h_{TASK} = \{0\}$ の場合) に分けることができる。前者の場合、図3に示すように、機構構造には、積集合に対応する作業動作を実行可能な機構部分が存在し、その機構部分は再使用できる。後者の場合、どの作業動作も実行できない。何れの場合にも、機構構造の修正、または、新規追加が必要である。

次に h_{MECH} と h_{TASK} の包含関係の判定手順を提案する。リー代数 h_{MECH} と h_{TASK} の包含関係 $h_{MECH} \supseteq h_{TASK}$ は、 h_{TASK} を構成する基底が h_{MECH} にすべて含まれるかどうかにより判定できる。リー代数 h_{MECH} と h_{TASK} がそれぞれ基底 $L_1^{MECH}, \dots, L_m^{MECH}$ 、 $L_1^{TASK}, \dots, L_n^{TASK}$ によって形成されていると仮定する。次の手順により包含関係が判定できる。

- $L_1^{MECH}, \dots, L_m^{MECH}$ と $L_1^{TASK}, \dots, L_n^{TASK}$ が構成するリー代数 h_{MECH} を自由度解析手続き⁹⁾(式(5)に相当)を用いて導出する。この際、重複する基底は削除される。
- $h_{MECH} = h_{TASK}$ の場合は、 h_{TASK} に含まれる基底がすべて重複している、すなわち h_{MECH} の中に含まれるため、 $h_{MECH} \supseteq h_{TASK}$ 、さもなくば $h_{MECH} \not\supseteq h_{TASK}$ として終了する。

リー代数に包含関係が存在しない場合には、上述したように、積集合を導出する必要がある。リー代数 h_{MECH} と h_{TASK} の積集合 $h_{MECH} \cap h_{TASK}$ は両方のリー代数に共通する基底によ

 Fig.3 Calculating product set between h_{MECH} and h_{TASK}

り定義できる。積集合 $h_{MECH} \cap h_{TASK}$ は $i=1, j=1$ として次の手順で導出できる。

- (i) $L_1^{MECH}, \dots, L_m^{MECH}$ と L_1^{TASK} が構成するリー代数 h_{MECH} を自由度解析手続きを用いて導出する。
- (ii) $h_{MECH} = h_{MECH}'$ の場合、 L_i^{TASK} は h_{MECH} の中に含まれるため、 L_i^{TASK} を積集合 $h_{MECH} \cap h_{TASK}$ の基底とする。
- (iii) $i < n$ の場合、 $i=i+1$ として(i)にもどる。
- (iv) $L_1^{TASK}, \dots, L_n^{TASK}$ と L_j^{MECH} に関しても(i)(ii)(iii)と同様のことを行う。
- (v) 拘束還元手続き⁹⁾により、冗長な基底を削除する。

5. リー代数に基づく機構構造の再構成

本章では、機構構造の再使用可能性判定の結果に基づき、機構構造を再構成する方法を示す。

最初に、リー代数 h_{MECH} 、 h_{TASK} を式(2)のように直和 $\oplus$ を用いて部分代数の組合せに分解する。

$$\begin{aligned} h_{MECH} &= h_{MECH_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH_m}, \\ h_{TASK} &= h_{TASK_1} \oplus \dots \oplus h_{TASK_n} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 h_{MECH_i} ($i=1, \dots, m$) と h_{TASK_j} ($j=1, \dots, n$) は、それぞれ h_{MECH} と h_{TASK} の部分代数であり、部分機構構造 $MECH_i$ 及び部分作業動作 $TASK_j$ に対応するように、図2に示すように分解できる。

前章で得られた各場合について、再構成後の機構構造を表現するリー代数を求める手順を提案する。

(1) $h_{MECH} \supseteq h_{TASK}$ の場合

この場合、 $h_{MECH} \cap h_{TASK} = h_{TASK}$ であることから、 h_{MECH} は式(3)により記述することができる。

$$\begin{aligned} h_{MECH} &= h_{MECH_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH_k} \oplus (h_{MECH} \cap h_{TASK}) \\ &= h_{MECH_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH_k} \oplus h_{TASK} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $h_{MECH} \cap h_{TASK}$ は式(2)における幾つかの h_{MECH_i} (または、 h_{TASK_j}) の共通の基底により構成されており、 $h_{MECH'_i}$ ($i=1, \dots, k$) は残りの部分代数を並べなおしたものである。ただし $k \leq m$ である。この場合、既存の機構構造をそのまま再使用することが可能であるが、 $h_{MECH'_i}$ は作業動作の実行には不要な自由度を示しており、 $h_{MECH'_i}$ に対応するよう機構構造を分割可能ならば、削除できる(図4(a)における L_4)。このように、 $h_{MECH'_i}$ を削除した空間への h_{MECH} の射影を、本論文では記号 $\ominus$ を用いて表現する。 $h_{MECH'_i}$ を削除した再構成後の機構構造を表現するリー代数 h_{MOD} を式(4)のように記述する。

Fig.4 Reconfiguration of mechanism in Lie algebra

$$\begin{aligned} h_{MOD} &= h_{MECH'_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH'_k} \oplus h_{TASK} \ominus h_{MECH'_i} \\ &= h_{MECH'_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH'_{i-1}} \oplus \\ &\quad h_{MECH'_{i+1}} \oplus \dots \oplus h_{MECH'_k} \oplus h_{TASK} \end{aligned} \quad (4)$$

複数の $h_{MECH'_i}$ の削除も同様に記述できる。

(2) $h_{MECH} \not\supseteq h_{TASK}$ の場合

機構構造が新たに指定された作業動作を実行可能とするためには、 $h \supseteq h_{MECH}$ かつ $h \supseteq h_{TASK}$ となるリー代数 h を導出し、既存の機構構造を含むより大きな機構構造 (h により表現される) を導出する必要がある。ここで、 h_{MECH} と h_{TASK} の自由度をすべて含んだ最小の機構構造に対するリー代数を求める手続きを本研究では合成と呼ぶこととする。リー代数は交換子積 $[A, B] = AB - BA$ (A, B はリー代数の元) について閉じている空間であり、 h_{MECH} と h_{TASK} の合成により生成されるリー代数も同様である。従って、合成されたリー代数は、 h_{MECH} と h_{TASK} の基底と交換子積から派生する基底とにより構成される空間であると言え、式(5)で書くことができる。

$$h = h_{MECH} \oplus h_{TASK} \oplus h_{MECH, TASK} \quad (5)$$

ここで $h_{MECH, TASK}$ は交換子積から派生する基底により構成されるリー代数を示している。ただし、 $h_{MECH, TASK}$ はもともと機構構造または作業動作の何れの自由度にも相当せず、本章の議論においては無視して差し支えないため、以下では省略する。

(a) $h_{MECH} \cap h_{TASK} = \{0\}$ の場合

この場合、式(5)は、式(2)を用いて、式(6)で記述できる。

$$\begin{aligned} h &= h_{MECH} \oplus h_{TASK} \\ &= h_{MECH_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH_m} \oplus h_{TASK_1} \oplus \dots \oplus h_{TASK_n} \end{aligned} \quad (6)$$

h_{MECH_i} は(1)の場合と同様に射影を用いて式(6)から削除できる。また、 h_{TASK_j} は作業動作を実行するために追加すべき自由度を表現している(図4(a)における L_1)。

(b) $h_{MECH} \cap h_{TASK} \neq \{0\}$ の場合

はじめに、式(2)に示す h_{MECH} 、 h_{TASK} は式(7)に示すように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} h_{MECH} &= h_{MECH'_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH'_k} \oplus (h_{MECH} \cap h_{TASK}), \\ h_{TASK} &= h_{TASK'_1} \oplus \dots \oplus h_{TASK'_l} \oplus (h_{MECH} \cap h_{TASK}) \end{aligned} \quad (7)$$

Fig.5 Module database and module selection process

ここで h_{TASK_j} ($j = 1, \dots, l$) は h_{TASK} のうち $h_{MECH} \cap h_{TASK}$ に含まれない部分代数を並べなおしたものである。ただし $l \leq n$ である。この場合、式(5)は式(8)で記述できる。

$$\begin{aligned} h &= h_{MECH} \oplus h_{TASK} \\ &= h_{MECH_1} \oplus \dots \oplus h_{MECH_k} \oplus h_{TASK_1} \oplus \dots \oplus h_{TASK_l} \oplus \\ &\quad (h_{MECH} \cap h_{TASK}) \end{aligned} \quad (8)$$

(a)の場合と同様に、 h_{MECH_i} は式(8)から削除することができ、 h_{TASK_j} は作業動作を実行するために追加すべき自由度を表現している。

図4(b)に示すように、導出されたリー代数から修正された機構構造を導出するため、 h_{TASK_j} (または h_{TASK_j}) を機構構造にマッピングする必要がある。このため、本研究では、図5に示すように、モジュールデータベースを構築し、その中から機構構造を選択することによってマッピングを行うこととする。各機構モジュールは図5(a)に示すように、構成部品 (n 部品) とそれらをつなぐ関節 ($n-1$ 関節) により記述されている。各関節はその運動に対応するリー代数の基底により記述されており、構成部品は形状へのリンク及び配置情報により記述されている。図5(b)に示すように、モジュールデータベースには、これらの情報がテキスト形式で記載されたファイルが、リー代数のタイプ別に格納されている。 h_{TASK_j} (または h_{TASK_j}) が入力されると、図5(b)に示すように、はじめに、構成する基底の組合せによりリー代数のタイプを特定し、次にそのタイプとユーザーが画面を見て指定したモジュール番号から、機構モジュールを選択する。

6. 計算機実験

本研究で提案した手法の有効性を確認するため、計算機プログラムを開発した。図6は、開発した再構成システムの表示画面を示している。左側のウィンドウは機構構造のモデルを表示しており、右側のウィンドウで選択した機構モジュールを使用して、再構成を行う。

6.1 問題設定1 (旋盤の端面穴加工専用機への改造)

図7(a)は旋盤を簡略化したモデルを示しており、図の右側に示すように座標系及びパラメータ ($x, z, \phi \in \mathbf{R}$) を設定した。図7の左右の表は、実装したプログラムによるリー代数の計算結果を示している。旋盤の各関節に対応するリー代数は、式(9)で記述できる。

Fig.6 Developed reconfiguration system

$$\begin{aligned} h_{MECH_1} &= \{xL_1 | x \in \mathbf{R}\}, h_{MECH_2} = \{zL_3 | z \in \mathbf{R}\}, \\ h_{MECH_3} &= \{\phi L_6 | \phi \in \mathbf{R}\} \end{aligned} \quad (9)$$

左表(i)はこれら基底を示している。すなわち、basis: a b c d e f は $aL_1 + bL_2 + cL_3 + dL_4 + eL_5 + fL_6$ を示している。これら基底を自由度解析手続きに適用すると、旋盤の機構構造を表現するリー代数 h_{MECH} は、式(10)で記述できる⁹⁾。

$$h_{MECH} = \{xL_1 + yL_2 + zL_3 + \phi L_6 | x, y, z, \phi \in \mathbf{R}\} \quad (10)$$

左表(ii)はこの結果を示している。 $h_{MECH_4} = \{yL_2 | y \in \mathbf{R}\}$ として、式(10)は式(11)のように分解することができる。

$$h_{MECH} = h_{MECH_1} \oplus h_{MECH_2} \oplus h_{MECH_3} \oplus h_{MECH_4} \quad (11)$$

ただし、式(10)及び式(11)において、もともとの変数 (x, z, ϕ) の数に対して基底の数が多いため、 $y = f(x, z, \phi)$ となり基底 L_2 は独立して取り扱えない。従って、 L_2 及び h_{MECH_4} は自由度を表現しているとは言えず、機構構造の再構成処理からは除外することとする。

端面に穴加工を行うために必要な作業動作を回転する工具を回転軸方向 (ここでは z 軸方向) に並進させる動作と仮定した。この作業動作を表現するリー代数 h_{TASK} は、左表(i)に示すように、式(12)で記述できる。

$$h_{TASK} = \{zL_3 | z \in \mathbf{R}\} \quad (12)$$

積集合の計算の結果、左表(iii)に示すように、基底 L_3 が導出され、左表(iv)に示すように、 $h_{MECH} \supseteq h_{TASK}$ と判定された。 $h_{MECH} \cap h_{TASK} = h_{MECH_2}$ であることから、作業動作を実行可能な機構構造を表現するリー代数 h は式(3)から式(13)で書ける。

$$h = h_{MECH_1} \oplus h_{MECH_3} \oplus h_{TASK} \quad (13)$$

ここで、 h_{MECH_1} 、 h_{MECH_3} は左表(v)の結果が示すように、作業動作に不必要な自由度を示しており、式(13)から削除できる。図7(b)はこれらの項に対応する機構部分を示している。従って、再構成後の機構構造を表現するリー代数 h_{MOD} は、式(14)で記述できる。

$$\begin{aligned} h_{MOD} &= h_{MECH_1} \oplus h_{MECH_3} \oplus h_{TASK} \ominus h_{MECH_1} \ominus h_{MECH_3} \\ &= h_{TASK} \end{aligned} \quad (14)$$

この結果から、図7(c)に示すように、例えば、 h_{MECH_1} に対応するテーブルを取り外し、 h_{MECH_3} に対応する主軸を固定し、スピンドル付きのタレットヘッドを追加するという再構成案を導出することができる。タレットヘッドを利用することにより様々な径の穴加工にも対応できる。

Fig.7 Results of mechanism reconfiguration

6.2 問題設定2（旋盤の3軸切削加工機への改造）

図7の右側には、同一の旋盤に対して、ワーク端面に3軸切削加工を行う作業動作 h_{TASK} を指定した場合の計算結果を示した。右表(vi)に示すように、 h_{TASK} は式(15)で記述できる。

$$h_{TASK} = h_{TASK_1} \oplus h_{TASK_2} \oplus h_{TASK_3} \quad (15)$$

ここで、 $h_{TASK_1} = \{xL_1 | x \in \mathbf{R}\}$ 、 $h_{TASK_2} = \{yL_2 | y \in \mathbf{R}\}$ 、 $h_{TASK_3} = \{zL_3 | z \in \mathbf{R}\}$ である。積集合の計算の結果、右表(vii)に示すように、基底 L_1 、 L_3 が導出され ($h_{MECH} \cap h_{TASK} = h_{MECH_1} \oplus h_{MECH_2}$)、右表(viii)に示すように、 $h_{MECH} \not\supset h_{TASK}$ と判定された。従って、作業動作を実行可能な機構構造を表現するリー代数 h は式(8)から式(16)で書ける。

$$h = h_{MECH_3} \oplus h_{TASK_2} \oplus (h_{MECH} \cap h_{TASK}) \quad (16)$$

右表(ix)に示すように、 h_{MECH_3} は作業動作に不必要な自由度を示しており、式(16)から削除できる。図7(d)はこの項に対応する機構部分を示している。また、 h_{TASK_2} は作業動作に必要な追加すべき自由度を示している。従って、再構成後の機構構造を表現するリー代数 h_{MOD} は式(17)で書ける。

$$\begin{aligned} h_{MOD} &= h_{MECH_3} \oplus h_{TASK_2} \oplus (h_{MECH} \cap h_{TASK}) \ominus h_{MECH_3} \\ &= h_{TASK_2} \oplus (h_{MECH} \cap h_{TASK}) = h_{TASK} \end{aligned} \quad (17)$$

この結果から、例えば、図7(e)に示すように、旋盤の主軸を固定し、 y 軸方向の並進機構を追加し、スピンドルヘッドを取り付けるという再構成案が導出できる。

7. おわりに

本研究では、機構構造に着目して、機構学的観点から、要求の変化（作業動作の変化）に対する製造システムの再設計を支援するための手法を提案することを目的として以下のことを行った。

- (1) リー代数間の包含関係に基づいて、機構構造の再使用可能性を判定する方法を提案した。提案した包含関係の判定手

続きにより、機構構造が作業動作を実行するのに十分な自由度を持っているか否かが判定でき、自由度という観点から容易に再使用可能性が判定できることを示した。

- (2) (1)の判定結果に基づき、機構構造を再構成する方法を提案した。機構構造及び作業動作に対応するリー代数間の積集合の導出手続きを提案し、作業動作と共通の自由度を持つ機構構造という観点から、容易に再使用可能な機構構造部分を明らかにできることを示した。部分代数の合成及び分解により、積集合に含まれない自由度として、機構構造に不足している自由度、余分な自由度が明らかになり、対応する機構構造の追加及び削除により容易に再構成案導出が行えることを示した。
- (3) 本手法の有効性を具体例への適用により確認した。

参考文献

- 1) 今村聡、徳永仁史：工作機械におけるモジュール化設計と再構成、精密工学会誌、**66**, 7, (2000) 1039.
- 2) 例えば、Y. Koren et al.: Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, **48**, 2, (1999) 527.
- 3) Y.-M. Moon and S. Kota: Synthesis of Reconfigurable Machine Tools with Screw Theory, Proc. ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, MECH-14066, (2000).
- 4) 新野秀憲、伊東諄：工作機械の構造創成方法（第3報）—結合パターンを用いたバリエーションデザイン方式による創成、日本機械学会論文集(C編)、**52**, 474, (1986) 788.
- 5) O. Chocron and P. Bidaud: Evolutionary Algorithms in Kinematic Design of Robotic Systems, Proc. IROS 97, (1997) 1111.
- 6) C. J. J. Paredis and P. K. Khosla: Kinematic Design of Serial Link Manipulators from Task Specifications, Int. J. Robot. Res., **12**, 3, (1993) 274.
- 7) G. Yang and I.-M. Chen: Task-Based Optimization of Modular Robot Configurations: Minimized Degree-of-Freedom Approach, Mechanism and Machine Theory, **35**, (2000) 517.
- 8) 例えば、梁成吉：行列と変換群、岩波書店、(1996).
- 9) 徳永仁史、松木則夫、今村聡、田中文基、岸浪建史：リー代数に基づく作業動作表現と拘束還元法による運動機構の概念設計、精密工学会誌、**68**, 4, (2002) 608.
- 10) R. M. Murray et al.: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, New York, CRC Press, (1993).