

多自由度マニピュレータの分解能指標を用いた パラレルメカニズムのリンクパラメータセット探索プログラム

藤原基芳^{*} , 須崎麻里^{**} , 加藤典彦^{**}

Search Program of Link Parameters on Parallel Mechanism that Utilizes the Index of Multiple D.O.F. Manipulator

Motoyoshi FUJIWARA, Mari SUSAKI and Norihiko KATO

To design fine processing parallel mechanism, there are some problems. One is the definition of the term "resolution". "Resolution" is frequently mentioned, but the resolution of multiple D.O.F. manipulator is not clearly defined. Another is the difficulty to determine link parameters. This report suggests the end effector resolution index of multiple D.O.F. manipulators. Resolutions of the actuators are associated with the end effector resolution by this index. Furthermore, an algorithm that searches for the link parameters from the specification of a manipulator is shown. The examples of the search which utilized the index as one of the specifications are shown.

Key words: Resolution, Manipulator, Link Parameter, Design, Parallel Mechanism

1. はじめに

多自由度マニピュレータの設計・特性解析に関する文献の中には、エンドエフェクタの「分解能」について言及しているものが多数ある(例えば、大岩ら¹⁾、増田²⁾)。しかし、多自由度マニピュレータのエンドエフェクタの「分解能」については明確な定義がない。「ロボット工学ハンドブック」³⁾や「機械工学便覧」^{4,5)}には、こういった用語の定義はされていない。JIS B3410⁶⁾には「機械的分解能」という用語は「ペンが取り得る最小移動量」と定義されているが、具体的な決定方法について記載されていない。また、JIS B0134⁷⁾には「最小変位」という用語が定義されているが、各軸毎に関するものである。多自由度マニピュレータは各

軸の動く方向と手先の動く方法が異なる場合が一般的なので、このことを考慮した「分解能」の定義が必要である。また増田²⁾が提案する特異値分解を用いた「分解能を表す指標」は多自由度マニピュレータの分解能の目安にはなるが、具体的にアクチュエータの微小運動がどのように手先の微小運動に変換されているか、について考察されていない。

そこで、本報告においてこれらのことを考慮した分解能指標を提案する。

また、マニピュレータのリンクパラメータを様々に変化させてその特性を解析した例は多数ある(例えば増田²⁾、新井⁸⁾)。それに対して、先に作業に必要な仕様を決めて、その仕様を満たすリンクパラメータを探索すると設計時間の短縮を図ることが出来るが、そうした例は少ない。例えば武田ら⁹⁾はモンテカルロ法を用いて運動伝達指数が

* 金属研究室

** 三重大学大学院工学研究科

しきい値以上であるリンクパラメータの範囲を決定している。しかし運動伝達指数はマニピュレータで特定の作業を行う場合に必須の仕様とは言い難い。また、この文献で用いられている機構定数領域の抽出アルゴリズムは運動伝達指数のみを判別に用いており、他の評価指数については考慮していない。マニピュレータの設計においては一つの評価指数のみが良ければよい、というわけではなく、様々な評価指標を総合的に評価する必要がある。

そこで、本報告第3章において分解能指標がしきい値を満たし、かつアクチュエータストロークが出来るだけ短くなるリンクパラメータセットを探索するアルゴリズムと、その計算結果を示す。ここではパラレルメカニズムを用いて微細作業を行うことを想定し、分解能のしきい値を設定した。また、一般的にアクチュエータストロークが短いほど安価になるので、よりアクチュエータストロークの短いリンクパラメータセットを採用するアルゴリズムとした。

なお、本報告では以下のように用語を定義した。

- ・リンク 剛体の構造物。
- ・リンクパラメータ リンク結合点間の寸法または角度を表す変数。
- ・リンクパラメータセット 1台のマニピュレータを構成するために必要なリンクパラメータの組合せ。

2. 手先分解能の指標について¹⁰⁾

2.1 「手先最小変位」の定義

本報告では、手先分解能の指標名を「手先最小変位」と呼び、以下のように定義する。

「対象とするマニピュレータの全てのアクチュエータ分解能を R_a とする。このマニピュレータのある動作範囲 M 内の全ての動作点において、全てのアクチュエータが $\pm R_a$ 動いても、手先の動作量が R_{eT} 以内であるとする。このとき、このマニピュレータの動作範囲 M における手先最小変位を R_{eT} とする。」

本章では、この手先最小変位をマニピュレータの微小運動学から計算する方法を示す。

また、微細作業においてはマニピュレータの分解能の制約により、手先の指令位置と実際に動いた位置に誤差が出ることが想定される。そこで、

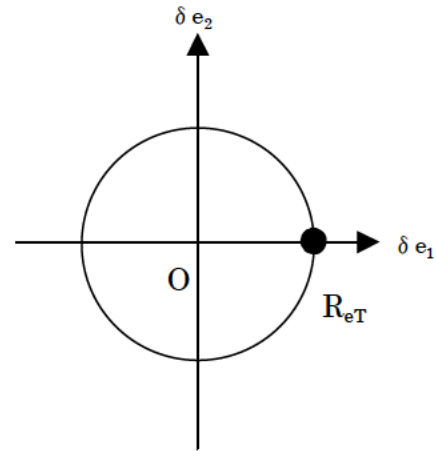


図1 手先の微小変位

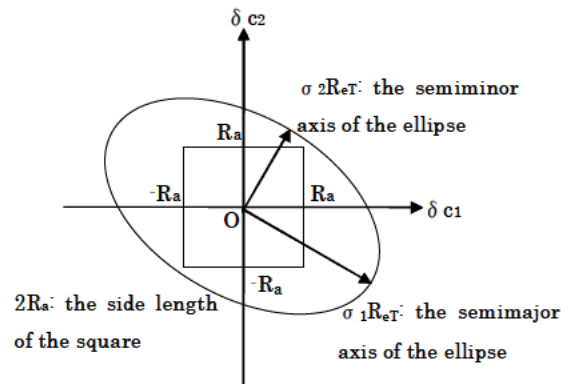


図2 アクチュエータの微小変位

マニピュレータの分解能に起因する位置決め誤差についても考察する。

2.2 2軸2自由度マニピュレータ

2.2.1 2軸2自由度マニピュレータの「手先最小変位」

2.1の最小変位を、2軸2自由度のマニピュレータを例に取り、微小運動学から計算する方法を示す。

マニピュレータの手先の座標を e 、アクチュエータの座標を c とし、 $c=[c_1, c_2]^T, e=[e_1, e_2]^T$ で表す。

このマニピュレータの微小運動学式を $\delta c = J \delta e$ とし、手先の微小運動を $\delta e=[\delta e_1, \delta e_2]^T$ 、アクチュエータの微小運動を $\delta c=[\delta c_1, \delta c_2]^T$ で表す。

ヤコビ行列 J の特異値分解を $J=U\Sigma V^T$ とする。 U, V^T は 2 行 2 列の正規直交行列(回転または反転のみで、拡大縮小のない行列)、 Σ は σ_1, σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0$) を対角要素とする 2 行 2 列の行列とする

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(下記) .

なお $\sigma_2=0$ の場合は過可動特異点となるので本報告では考慮しない .

この時 , 2.1 の定義文中にある「手先の動作量 R_{eT} 」は , e 空間中で原点を中心とした半径 R_{eT} の円を表す(図 1 参照) .

$c = J_e = U_e V_e^T e$ なので , 図 1 の円は c 空間中では図 2 の楕円に写像される . 定義文中の「全てのアクチュエータが $\pm R_a$ 動く」とは , 図 2 の正方形の頂点を表す . したがって , 手先最小変位が R_{eT} 以下であるためには , 図 2 の楕円形が正方形の外部にあればよいことになる .

原点から正方形の頂点までの距離は $\sqrt{2}R_a$. 楕円の短径は $\sigma_2 R_{eT}$ なので , 楕円が正方形の外部にある , すなわちマニピュレータが手先最小変位 R_{eT} を満たす十分条件は下式のとおりである .

$$\sigma_2 R_{eT} \geq \sqrt{2}R_a \quad (2)$$

$$R_{eT} \geq \sqrt{2}R_a / \sigma_2 \quad (3)$$

したがって , 手先のある動作領域内のすべての動作可能な点においてヤコビ行列の特異値を計算し , 最小の σ_2 (これを σ_{2min} とする)を求めれば , この動作領域内における R_{eT} は $\sqrt{2}R_a / \sigma_{2min}$ となる .

2.2.2 分解能に起因する 手先位置決め誤差

c 空間において , 指定したアクチュエータ位置と実際に動作可能なアクチュエータ位置の誤差は最大で $\sqrt{2}R_a / 2$ になる . この誤差が e 空間に写像された場合 , 最大で $(\sqrt{2}R_a / \sigma_2) / 2$ となる .

したがって , 手先のある動作領域内のすべての動作可能な点においてヤコビ行列の特異値を計算し , 最小の σ_2 (σ_{2min})を求めれば , この動作領域内における指定した手先位置と実際に動作可能な手先位置の誤差は最大で $(\sqrt{2}R_a / \sigma_{2min}) / 2 = R_{eT} / 2$ となる .

2.3 6 自由度マニピュレータ

2.3.1 6 自由度マニピュレータの 「手先最小変位」

マニピュレータの分解能をわかりやすく評価するためには , 並進方向と回転方向を個別に評価す

るのがよい . そこで , 本節では手先最小変位を並進 R_{eT} , 回転 R_{eR} と定めて考察する . 今 , 微小運動学式がヤコビ行列 J を用いて $c = J_e e$ で表されるとする . また , 手先の微小運動 e およびアクチュエータの微小運動 c が下記のように表されるとする .

$$e = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T \quad (4)$$

$$c = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6]^T \quad (5)$$

J を下記のように部分行列で表す .

$$J = [J_T(6 \times 3) \quad J_R(6 \times 3)] \quad (6)$$

J_T は手先の並進運動のみに関わる成分 , J_R は手先の回転運動のみに関わる成分となる .

この J_T を解析することにより

$x = y = z = 0$ の場合の手先の並進運動について解析することができる . J_T の特異値分解を下式で表す .

$$J_T = U_T \Lambda_T V_T^T \quad (7)$$

U_T は 6 行 6 列の正規直交行列 , Λ_T は $\Lambda_T = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & & & \\ & \lambda_2 & & & & \\ & & \lambda_3 & & & \\ & & & \lambda_4 & & \\ & & & & \lambda_5 & \\ & & & & & \lambda_6 \end{pmatrix}$ ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 > 0$) を対角要素とする 6 行 3 列の行列 , V_T^T は 3 行 3 列の正規直交行列になる .

c 空間でアクチュエータが動作可能な 6 次元立方体の頂点の座標を表す位置ベクトルは $(\pm R_a, \pm R_a, \pm R_a, \pm R_a, \pm R_a, \pm R_a)$ になる . このベクトルのノルムは $\sqrt{6}R_a$ になる . また , e 空間中の半径 R_{eT} の球に J_T をかけて c 空間に写像すると , 6 次元楕円体になる . この 6 次元楕円体上で , 原点からの最小ノルムは , $\lambda_3 R_{eT}$ である .

したがって , 手先最小変位を表す楕円体が , アクチュエータ分解能を表す 6 次元立方体の外部にある十分条件は , $\sigma_{T3} R_{eT} \geq \sqrt{6}R_a$ より ,

$$R_{eT} \geq \sqrt{6}R_a / \sigma_{T3} \quad (8)$$

となる .

したがって , 手先のある動作領域内のすべての動作可能な点においてヤコビ行列の特異値を計算し , 最小の λ_3 ($= \lambda_{3min}$) を求めれば , この動作領域内にて

$$R_{eT} = \sqrt{6}R_a / \sigma_{T3min} \quad (9)$$

となる .

また , 回転方向の手先最小変位に関しては , 並進運動の場合と同様に J_R の特異値分解を $J_R = U_R \Lambda_R V_R^T$, Λ_R の対角要素を $\lambda_{R1}, \lambda_{R2}, \lambda_{R3}$ ($\lambda_{R1} = \lambda_{R2} = \lambda_{R3} > 0$) , 手先のある動作領域内の最小の λ_{R3} を λ_{R3min} とすると

$$R_{eR} = \sqrt{6}R_a / \sigma_{R3min} \quad (10)$$

となる。

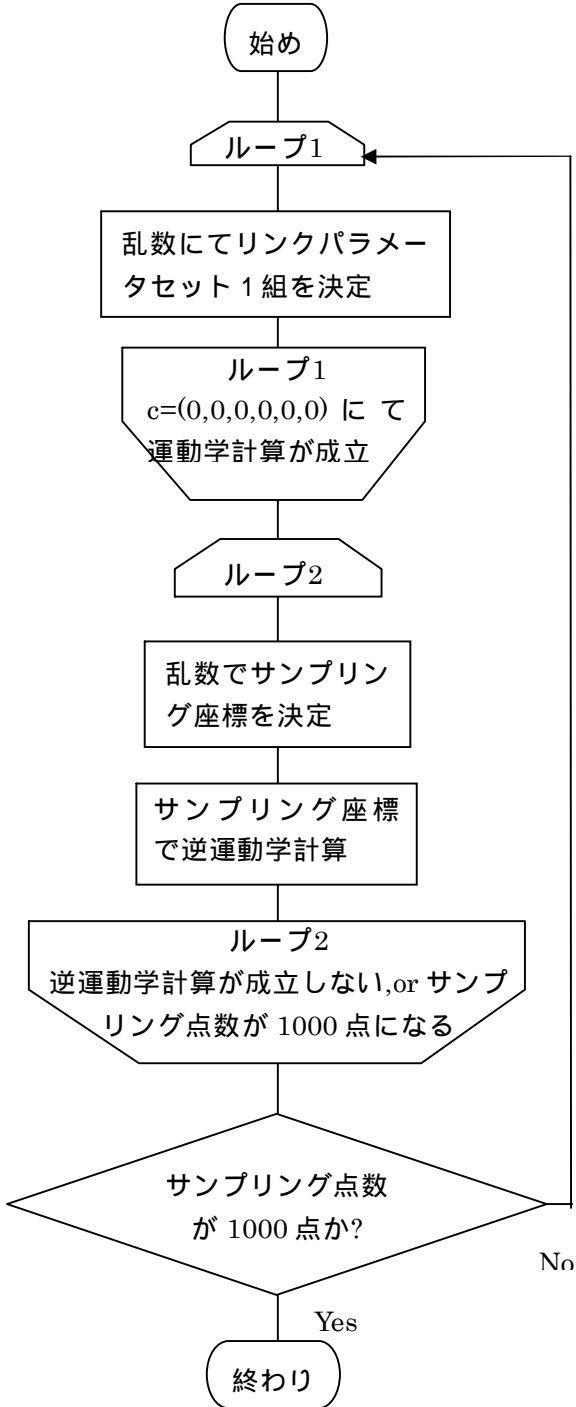


図3 初期リンクパラメータセット決定プログラムのフローチャート

2.3.2 分解能に起因する手先位置決め誤差

c 空間において、指定したアクチュエータ位置と実際に動作可能なアクチュエータ位置の誤差

は最大で $\sqrt{6}R_a/2$ になる。この誤差が e 空間に写像された場合、最大で並進方向で $(\sqrt{6}R_a/\sigma_{T3})/2$ 、回転方向で $(\sqrt{6}R_a/\sigma_{R3})/2$ となる。

したがって、手先のある動作領域内のすべての動作可能な点においてヤコビ行列の特異値を計算し、最小の $T3(= T3min)$ 、 $R3(= R3min)$ を求めれば、この動作領域内における指定した手先位置(姿勢)と実際に動作可能な手先位置(姿勢)の誤差は最大で $(\sqrt{6}R_a/\sigma_{T3min})/2=R_{eT}/2$ 、 $(\sqrt{6}R_a/\sigma_{R3min})/2=R_{eR}/2$ となる。

3. リンクパラメータセット探索

本章では、作業に必要な仕様を入力すると、その仕様を満たすリンクパラメータセットを探索するプログラムのアルゴリズムを説明する。また、そのプログラムを用いたリンクパラメータセット探索例を示す。

3.1 プログラムについて

乱数で初期リンクパラメータセットを決定する「初期リンクパラメータセット決定プログラム」と、初期リンクパラメータセットから仕様を満たし、より優れた特性を持つリンクパラメータセットを探索する「リンクパラメータセット探索プログラム」を作成した。プログラムは、MaTX(<http://www.matx.org/>)で作成した。

3.1.1 初期リンクパラメータセット決定プログラム

初期リンクパラメータセット決定プログラムのフローチャートを図3に示す。このプログラムにより各リンクパラメータの初期値を決定し、リンクパラメータセットを作成する。

3.1.2 リンクパラメータセット探索プログラム

リンクパラメータセット探索プログラムのフローチャートを図4に示す。

フローチャート中の評価関数1は、マニピュレータの仕様を表す関数群とする。評価関数1は、必ず特定のしきい値以下(あるいは以上)になる必要がある。

フローチャート中の評価関数2はマニピュレータの特性の良し悪しを表す関数群とする。この関数はできるだけ大きな値(あるいは小さな値)になるのがよい。

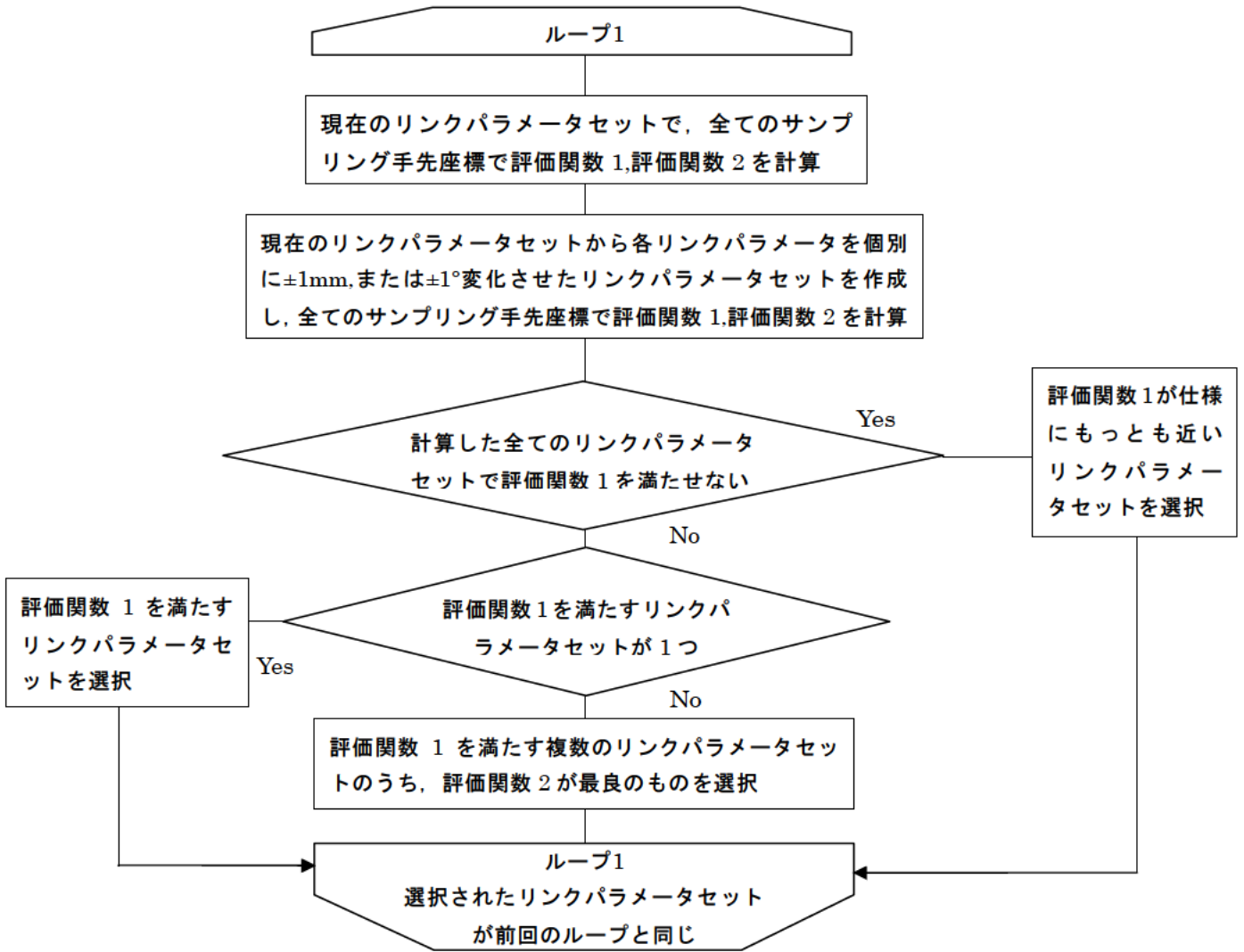


図 4 リンクパラメータセット探索プログラムのフローチャート

表 1 パラレルメカニズムの仕様
手先仕様

	並進	回転
動作領域	±3mm	±0.5°
最小変位	1μm	0.003°

アクチュエータ仕様

分解能	1μm
ストローク	未定

3. 2 リンクパラメータセット探索例

本節では軽負荷の微細作業を想定して表 1 の仕様の 6 軸パラレルメカニズムを設計する. 表 1 中の最小変位の計算には, 2 章の分解能指標を用いた. 3. 1 節のプログラムを用いて設計を行った.

各リンクパラメータの値(寸法および角度)は, 図 5 の範囲で乱数で決定した.

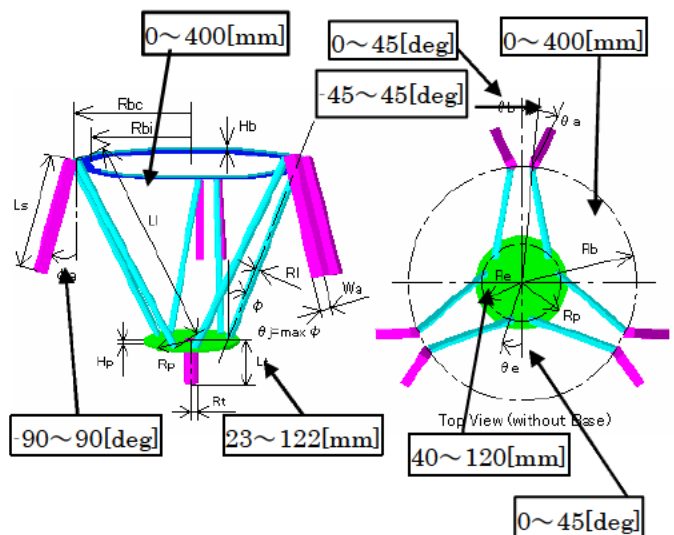


図 5 パラレルメカニズムのリンクパラメータ式(9), (10)より

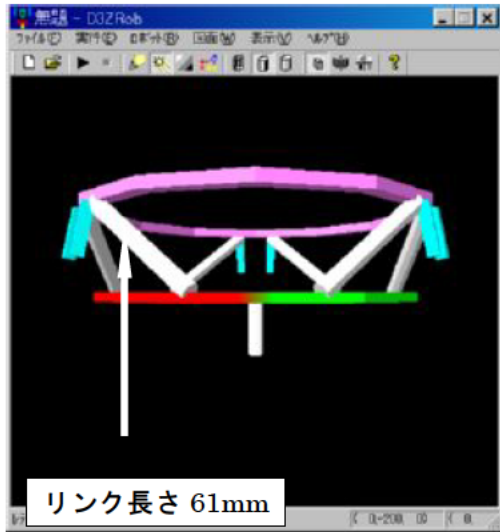


図6 「No.7 収束値」の模式図

$$\sqrt{6}R_a / (\sigma_{T3}R_{eT}) \leq 1 \quad (11)$$

$$\sqrt{6}R_a / (\sigma_{R3}R_{eR}) \leq 1 \quad (12)$$

を満たせば仕様の分解能を満たすので、評価関数1は式(11), (12)の左辺の最大値とした。

また、逆運動学解の最大値を評価関数2とした。この値はアクチュエータの動作範囲を表す。この値が小さいほど、短いアクチュエータを使うことができる。

なお、本報告の仕様では動作可能な座標は約 1.0×10^{18} 点となる。本来は動作可能な全ての座標について逆運動学計算を行うべきであるが、計算時間がかかりすぎて不可能である。本報告では初期リンクパラメータセット決定プログラム、リンクパラメータセット探索プログラムともにサンプリング点数は1000点とした。

3.3 計算結果

表2に計算結果を示す。10組のリンクパラメータセットが初期リンクパラメータセット決定プログラム(3.1.1参照)により決定され、それらを初期値としてリンクパラメータセット探索プログラム(3.1.2参照)により10組の収束値が計算された。

表2の「評価関数1」の「並進」、「回転」がそれぞれ式(11), (12)の左辺の値である。この両方が1以下のリンクパラメータセットが、仕様を満たしている。

また表中の「Ls」がアクチュエータストロークであり、これが評価関数2である。

仕様を満たすものは7組ある(表中の「仕様」の欄に○がついているもの)。ただし装置の大きさは大きくばらついたので、実機を製作する際には小型の「No.5 収束値」または「No.7 収束値」のものを用いるのが現実的である。図6に表2の「No.7 収束値」の模式図を示す。

4. まとめ

多自由度マニピュレータの手先分解能の指標を提案した。そして、微小運動学を用いた計算方法を示した。また、アクチュエータ分解能に起因する手先位置決め誤差を示した。この指標により、アクチュエータの分解能と手先の分解能を対応づけることができる。しかし、本報告ではヤコビ行列を用いた近似計算を行ったので、近似による誤差が生じる可能性がある。近似による誤差が生じない逆運動学計算による検証が今後の課題である。

また、マニピュレータの仕様を決定してからそれを満たすリンクパラメータセットを探索するプログラムを開発した。そして、手先分解能の指標を仕様の一つとしたパラレルメカニズムのリンクパラメータセット探索の例を示した。このプログラムは多自由度マニピュレータ設計の有用なツールになる感触を得た。しかし、初期値依存性や局所的最適解に陥る、といった問題点もある。このプログラムの改良は今後の課題である。

参考文献

- 1) 大岩孝彰ほか：“パラレルメカニズムを用いた6自由度微動ステージ”. 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集(IV), p418-419(1997)
- 2) 増田峰知：“直動型パラレルメカニズムの解析と応用”. 大阪大学大学院学位論文(2003)
- 3) 日本ロボット学会編：“ロボット工学ハンドブック”. コロナ社(1990)
- 4) 日本機械学会編：“機械工学便覧 A.基礎編 B.応用編”. 丸善(1987)
- 5) 日本機械学会編：“機械工学便覧 C.エンジニアリング編”. 丸善(1989)
- 6) “JIS B3410 プロッタ用語”. 日本規格協会, p4(1996)

- 7) “JIS B0134 産業用マニピュレーティングロボット”. 日本規格協会, p14(1998)
- 8)新井健生: “静力学特性に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と統合”. 日本ロボット学会誌, 10, 4, p526-533(1992)
- 9)武田行生ほか: “運動伝達性に優れた6自由度空間パラレルマニピュレータの開発”. 日本機械学会論文集(C編), 61(589), p3781-3788(1995)
- 10)藤原基芳ほか: “手先分解能指標を評価値としたパラレルメカニズムのリンクパラメータ探索プログラム”. ロボティクス・メカトロニクス講演会'06予稿集 CD-ROM, 1 A1-B02(2006)

表 2 計算結果

		Rb	Re	θ_b	θ_e	θ_a	fa	Ll	Tx	Ty	Lt	Ls	z小	評価関数1		仕様
		mm	mm	deg	deg	deg	deg	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	並進	
No.1	初期値	158	44	19	7	6	54	375	0	0	23	66	8	0.9	0.4	
	収束値	157	44	19	7	7	53	375	-20	19	43	55	8	1	0.4	
No.2	初期値	153	108	16	22	-41	-82	345	0	0	80	59	7	6.6	0.9	×
	収束値	153	110	3	19	-15	-90	347	-1	-1	96	80	2	1.1	0.1	×
No.3	初期値	325	109	10	45	10	-4	391	0	0	32	12	3	2.2	1.9	×
	収束値	325	109	10	44	12	33	391	5	-32	77	25	3	1	0.7	
No.4	初期値	31	46	38	29	7	72	355	0	0	49	31	3	23.6	8.3	×
	収束値	32	46	50	29	7	76	355	-2	3	42	93	6	4.5	1.3	×
No.5	初期値	83	86	16	18	-12	-12	62	0	0	72	15	6	1.9	0.3	×
	収束値	82	86	6	18	-10	10	62	34	24	32	23	6	1	0.2	
No.6	初期値	31	46	38	29	7	72	355	0	0	65	31	3	23.7	8.3	×
	収束値	32	46	50	29	7	76	354	-3	4	107	91	6	4.5	1.4	×
No.7	初期値	83	86	16	18	-12	-12	62	0	0	65	32	3	1.9	0.3	×
	収束値	83	77	7	18	-11	11	61	55	3	32	23	6	1	0.3	
No.8	初期値	124	85	21	35	-9	33	395	0	0	75	18	6	9.8	8.1	×
	収束値	139	85	21	36	-6	67	395	2	1	76	100	6	1.3	1.3	×
No.9	初期値	142	78	35	3	44	-20	383	0	0	95	10	3	7	1.7	×
	収束値	256	78	3	3	64	-66	383	0	1	87	24	3	1	0.2	
No.10	初期値	132	103	40	31	-11	10	50	0	0	80	24	6	1.1	0.3	×
	収束値	132	103	41	31	-14	11	49	-1	-39	32	25	6	1	0.3	

Rb:ベースプレート半径, Re:エンドプレート半径, θ_b : ベースプレートとリンクの取り付け角, θ_e : エンドプレートとリンクの取り付け角, θ_a : アクチュエータの回転角, fa: アクチュエータの傾斜角, Ll: 連結ロッドの長さ, Tx, Ty: ツールの x,y 座標, Lt: ツールの長さ, z小: 作業に使う z 座標の最小値

仕様: (分解能の仕様を満たす), ×(分解能の仕様を満たさない)

用語については“パラレルメカニズム・シミュレータ”のヘルプファイル参照.

(<http://www.robot.mach.mie-u.ac.jp/research/parallel/download.html>)