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

新 井 健 生*

Analysis and Synthesis of a Parallel Link Manipulator Based on Its Statics

Tatsuo ARAI*

Characteristics of the parallel link mechanism are discussed in comparison with a conventional serial link mechanism in terms of kinematics, statics, and singularity problem. In order to design a high performance manipulator the parallel link mechanism is analyzed by using a singular value decomposition applied to the forward statics. In this analysis a performance index is introduced that indicates how uniformly the mechanism produces force and moment at its end effector. A suboptimal manipulator configuration is proposed that has a better performance index than the conventional Stewart platform.

Key Words : Kinematics, Mechanism Design, Parallel Link, Singular Value, Statics

1. 序 論

ロボットが様々な分野で用いられ、求められる機能や性能も多種多様となっている。ロボットの腕の機能であるマニピュレータについても、作業速度、位置決め精度、負荷容量、力制御性、耐環境性など数多くの性能が要求されており、これらの要求を満たすような機構の開発や制御手法の研究が盛んに行なわれている。従来の産業用ロボットやマニピュレータでは、回転型の関節対偶を組み合わせたシリアルリンク機構が多用され、これらについては機構や制御の観点から十分な研究が行なわれてきた。

スチュワートプラットフォームに代表されるパラレルリンク機構は¹⁾、これまでに航空機のシミュレータなどに用いられていたが、マニピュレータとしての有用性に着目され、基礎研究が盛んになりつつある。Landsbergerは直動リンクの代わりに駆動ケーブルを用いたマニピュレータを提案し、可動部がより軽量で動特性の優れた機

構を提案している²⁾。津坂らは可動範囲の拡大を図るため駆動部にパンタグラフリンクを用いたマニピュレータを提案し静力学と機構の特性解析を行なった³⁾。船橋らも同様の観点から作業領域や制御性、剛性などに関する設計要求に適合するような、回り対偶と球対偶からなる機構を提案している⁴⁾。また、Clavelは回り対偶からなる3本のリンクで構成された3自由度のマニピュレータを提案し高速動作を実現した⁵⁾。

一方、パラレルリンク機構は宇宙用マニピュレータのエンドフェクタ⁶⁾、移動ロボット上のマニピュレータの動特性を評価するためのシミュレータ⁷⁾、マイクロマニピュレータ^{8,9)}、マスタジョイスティック¹⁰⁾など、様々な応用が提案されている。さらに、パラレルリンクマニピュレータの力学に関しても従来のスチュワートプラットフォームについて、運動学、動力学、特異点解析等の研究が活発に行なわれている^{11,14)}。

このように、パラレルリンク機構はロボットマニピュレータとしての基本性能と有用性が明かになり、その応用分野も広がりつつある。ところで、代表的なパラレルリンク機構であるスチュワートプラットフォームは、機

原稿受付 1991年9月24日

* 機械技術研究所ロボット工学部

構の幾何学的対称性から構成しやすい機構であるが、リンク配置の基準が明らかではない。そこで本論文では、スチュワートプラットフォームと同じようにエンドエフェクタで大きな発生力が得られ、かつ逆運動学が容易に解ける、直動リンク機構を組み合わせて構成するパラレルリンクマニピュレータの機構解析と統合を行なう。まず始めに、直動リンク機構で構成されたパラレルリンクマニピュレータの力学特性を解析し、次にマニピュレータとしての作業性を高めるために、エンドエフェクタで力が一様に発生できる機構を考察する。具体的には静力学特性に着目し、力伝達行列の条件数を評価指数として、これを最適とするような機構を統合する。

2. パラレルリンク機構の力学

本研究で考察するパラレルリンク機構は、Fig. 1に示すように能動的な直動リンクを有するものである。ベース部とエンドエフェクタとは、6自由度を有するリンク6本(L1~L2)により並列的に結合されている。各リンクは2つのユニバーサルジョイント、ロータリージョイント、しゅう動ジョイントから構成されており、この中でしゅう動ジョイントのみが能動的に駆動される。このような機構の特性を評価するために、ここでは運動学、微小運動学、静力学について簡単に考察する。

2.1 運動学

パラレルリンク機構の運動学は逆運動学を基本として求めることができる。逆運動学は、エンドエフェクタの基準座標上での位置 $\mathbf{p}_h = (p_{hx}, p_{hy}, p_{hz})^T$ と方向(例えばオイラー角 ϕ, θ, ψ)を与えた時、関節変位すなわちAB間の長さを求める計算となる。Fig. 2はエンドエフェクタとリンク間の幾何学的関係を示したものである。

Fig. 1 Basic configuration of a parallel link manipulator

xyz はベース部に固定された基準座標系を表しており、 $x_h y_h z_h$ はエンドエフェクタの中心に固定されたハンド座標系である。リンク i の長さ AB を l_i とし、リンクとエンドエフェクタとの結合点 A をハンド座標で記述した位置ベクトルを $\mathbf{p}_i^h$ 、リンクとベースとの結合点 B をベース座標で記述した位置ベクトルを $\mathbf{p}_{bi}$ とする。ハンド座標の原点をベース座標で記述した位置ベクトルを $\mathbf{p}_h$ 、ハンド座標の方向を 3×3 行列 R で表すものとする。逆運動学はこの $\mathbf{p}_h, R$ から $l_i (i=1,6)$ を求める計算となり、以下のようになる。

$$\mathbf{s}_i = R \mathbf{p}_i^h \quad (1)$$

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{p}_h + \mathbf{s}_i - \mathbf{p}_{bi} \quad (2)$$

$$l_i = |\mathbf{w}_i| = (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{w}_i)^{1/2} \quad (3)$$

$$\mathbf{z}_i = \frac{\mathbf{w}_i}{l_i} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{w}_i, \mathbf{z}_i$ はリンク i のリンクベクトル、単位方向ベクトルを表わし、また記号 $\cdot$ はベクトルの内積を表している。

一方、リンク変位よりエンドエフェクタの位置と方向を求める順運動学は、非常に複雑な非線形方程式となり¹²⁾、極く特殊な機構を除いて一般解は求められていないが、次に示す微小運動学を用いて逐次的に近似解を求めることは可能である¹⁵⁾。

2.2 微小運動学

ここでは、リンクとエンドエフェクタ間の微小変位の関係を求める。リンク i の微小変位を δl_i とし、エンドエフェクタの微小変位を $\delta \mathbf{x} = (\delta \mathbf{p}_h^T, \delta \boldsymbol{\Omega}^T)^T$ とする。ここで、 $\delta \mathbf{p}_h$ はエンドエフェクタの微小並進運動を、 $\delta \boldsymbol{\Omega} = (\delta \Omega_x, \delta \Omega_y, \delta \Omega_z)^T$ はエンドエフェクタのベース座標回

Fig. 2 Geometry of the parallel link manipulator

りの微小回転運動をベース座標系で表現したものである。(2)式を書き改めると次のようになる。

$$l_i z_i = p_h + R p_i^h - p_{bi} \quad (5)$$

(5)式の両辺を微分する。

$$\delta l_i z_i + l_i \delta z_i = \delta p_h + \delta R p_i^h + R \delta p_i^h - \delta p_{bi} \quad (6)$$

ここで、 $\delta p_i^h = \delta p_i^h = 0$ であり、またハンド座標系は $\delta \Omega$ で回転しているので δR については次式がなり立つ。

$$\delta R = R_{\delta \Omega} R = \begin{pmatrix} 0 & -\delta \Omega_z & \delta \Omega_y \\ \delta \Omega_z & 0 & -\delta \Omega_x \\ -\delta \Omega_y & \delta \Omega_x & 0 \end{pmatrix} R \quad (7)$$

したがって、(6)式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta l_i z_i + l_i \delta z_i &= \delta p_h + R_{\delta \Omega} R p_i^h \\ &= \delta p_h + R_{\delta \Omega} s_i \\ &= \delta p_h + \delta \Omega \times s_i \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\times$ はベクトル積を表している。(8)式の両辺と z_i との内積をとると次のようになる。

$$\delta l_i + l_i z_i \cdot \delta z_i = z_i \cdot \delta p_h + z_i \cdot \delta \Omega \times s_i \quad (9)$$

単位ベクトル z_i の性質から $z_i \cdot \delta z_i = 0$ が成立するので、(9)式は次のように整理される。

$$\begin{aligned} \delta l_i &= z_i \cdot (\delta p_h + \delta \Omega \times s_i) \\ &= z_i \cdot \delta p_h + (s_i \times z_i) \cdot \delta \Omega \end{aligned} \quad (10)$$

$\delta l = (\delta l_1, \dots, \delta l_6)^T$ とし、(10)式をベクトルと行列表現に改めると次の関係式が得られる。

$$\delta l = J \delta x \quad (11)$$

$$J = \begin{bmatrix} z_1^T & (s_1 \times z_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ z_6^T & (s_6 \times z_6)^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

(12)式で得られた J は、従来のシリアルリンクマニピュレータで定義されるヤコビ行列の逆行列を表している。さらに、(11)式より次の速度に関する逆運動学がただちに求まる。

$$\dot{l} = J \dot{x} \quad (13)$$

ここで $\dot{x} = (\dot{p}_h^T \omega^T)^T$ 、 $\omega = d\Omega/dt$ である。

2.3 静力学

各リンクで発生する力を t_i 、エンドエフェクタで発生する力とモーメントをそれぞれ $f = (f_x f_y f_z)^T$ 、 $m = (m_x, m_y, m_z)^T$ とする。ここで、 f_i, m_i はそれぞれベース座標系の i 軸方向の力とその回りのモーメントを表している。機構全体が力学的に平衡状態にあると仮定して、リンクおよびエンドエフェクタがそれぞれ $\delta l, \delta x$ だけ微小運動を行なったとすると、仮想仕事の原理より機構全体が行なう仕事は次のようになる。

$$(\delta p_h^T f + \delta \Omega^T m) - \sum_{i=1}^6 \delta l_i t_i = 0 \quad (14)$$

さらに、 $F = (f^T, m^T)^T$ 、 $T = (t_1, \dots, t_6)^T$ として、(14)式を整理すると、

$$\delta x^T F - \delta l^T T = 0 \quad (15)$$

微小運動学(11)式を(15)式に代入することにより次の関係式が得られる。

$$F = J^T T \quad (16)$$

2.4 特異点の性質

マニピュレータのような多自由度の機構では、力学的な性質が大きく変化する位置や姿勢が存在する。これを特異点と呼んでおり、微小運動学を表す行列 J が $\det(J) = 0$ となるような位置姿勢である。パラレルリンク機構の特異点を(11)式に従って定性的に解釈すると、このような位置姿勢ではエンドエフェクタがある方向 δx_s に運動を行なっても、リンクの変位が全く生じないことになる。あるいは、(16)式にしたがって解釈するならば、リンクの発生力がエンドエフェクタのある方向には全く寄与しないこと、すなわちその方向の剛性が失われることになる。これらの考察より、パラレルリンク機構の場合もシリアルリンク機構と同様に、動作制御においてはこのような特異点を回避することが必要である。スチュワートプラットフォームについては、いくつかの特異点がこれまでに見つけられている。

2.5 シリアルリンク機構との対比

パラレルリンク機構の力学をシリアルリンク機構と比較すると以下のように整理できる。

1) 逆運動学が容易に求められ、微小運動学でも同じくエンドエフェクタの微小変位からリンクの微小変位が直接的な行列演算で求められ、シリアルリンク機構の場合と双対である。したがって、パラレルリンクマニピュレータでは、基準座標系でエンドエフェクタを軌道制御する際は計算が容易に行なえる。一方、リンク変位よりエンドエフェクタの位置方向を求める場合は計算が困難であり、何らかの工夫を要する。

2) 静力学では順方向が直接的な行列演算で求まり、この場合もシリアルリンク機構との間に双対性がある。パラレルリンクマニピュレータでは、リンクの発生力からエンドエフェクタでの発生力やトルクを推定することは容易である。逆に、力制御に必要なリンク発生力を求める場合は逆行列の演算を行なう必要があり、計算量を要する。

3) 特異点での挙動は、シリアルリンク機構ではエンドエフェクタのある方向の運動が失われるが、パラレルリンク機構ではエンドエフェクタのある方向で力やモーメントが発生できない。

3. パラレルリンクマニピュレータの機構評価

パラレルリンク機構の特性を評価する一つ的手段として、エンドエフェクタでの力の発生力に着目する。2章

(16) 式で求めた静力学は、リンク発生力 T がエンドエフェクタでの発生力にどのように変換されているかを表すものと解釈することができる。この変換は行列 J^T による線形変換であるから、これを次式のように特異値分解することにより、その性質がより一層明かとなる。

$$J^T = U \Sigma V^T \quad (17)$$

ここで、 $U = (u_1, \dots, u_6)^T$ 、 $V = (v_1, \dots, v_6)^T$ は 6×6 直交行列であり、 Σ は次のとおりである。

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_6) \quad (18)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_6 \geq 0 \quad (19)$$

6 自由度パラレルリンクマニピュレータが特異点でなければ、6 つの 0 でない特異値が存在する。このような特異値分解を利用することにより静力学特性の定性的解釈が以下のように行なえる。(17) 式を (16) 式に代入し整理すると次のようになる。

$$U^T F = \Sigma V^T T \quad (20)$$

又は、

$$u_i^T F = \sigma_i v_i^T T \quad (21)$$

これは、リンク発生力を表す T 空間における v_i 方向の成分が、エンドエフェクタでの発生力を表す F 空間において、 u_i 方向に σ_i 倍されて出力されることを示している。もしリンク発生力を T 空間の中であらゆる方向に一樣に (等方的に) 発生した場合、すなわち $|T| \leq 1$ となるようなあらゆる力を加えた場合、 F 空間では Fig. 3 に示すような発生力が得られる。図から明らかなように、特異値の大きい方向ほどエンドエフェクタでの力やモーメントが発生しやすいこととなる。マニピュレータの機能としては、エンドエフェクタでの発生力はできる限り一樣であることが望ましい。したがって、最大特異値と最小特異値の比、すなわち条件数をできるかぎり 1 に近づける必要がある。このような議論はシリアルリンクマニピュレータの場合についても行なわれている¹⁰⁾。

ところで、行列 J^T の条件数はエンドエフェクタで発

生する力とトルクの両者が複合されたものである。機構を適切に評価するためには、これらを別個に評価しなければならない。そこで、(16) 式の中で力とトルクに寄与する部分を分離し、各々について個別に特異値分解を適用する。すなわち、行列 J^T を次のように分解する。

$$J^T = \begin{bmatrix} J_f^T \\ J_m^T \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで、 J_f^T 、 J_m^T は 3×6 行列であるから、それぞれ 3 つの特異値 σ_{fi} 、 σ_{mi} が存在する。以上より、パラレルリンクマニピュレータの評価指数として次の 3 つの条件数を用いる。

$$C = \frac{\sigma_1}{\sigma_6} \quad (23)$$

$$C_f = \frac{\sigma_{f1}}{\sigma_{f3}} \quad (24)$$

$$C_m = \frac{\sigma_{m1}}{\sigma_{m3}} \quad (25)$$

機構評価の一例として、Fig. 4 に示すスチュワートプラットフォームの評価指数を求めてみる。図中、 r_h, r_b はそれぞれ 300 mm, 150 mm とし、 $p_h = (0, 0, 600)^T$ [mm]、 $R = I_3$ とする。結果を Table 1 に示す。力については、 z 軸方向の出力が x 軸および y 軸方向の出力に比して 3 倍以上となっている。またモーメントに関しては、 x 軸あるいは、 y 軸回りの出力が z 軸回りに比して 1.6 倍程度となっている。これは、リンクの結合方式から明らかなように、各リンクの引っ張り押しつづけが x 軸および y 軸方向より z 軸方向へ大きく寄与しているためである。

4. パラレルリンクマニピュレータの統合

4.1 3 自由度機構の統合

3 章で示した評価基準を最適にするようなパラレルリンク機構の統合を試みるため、まず始めに 3 自由度の機構を考察する。Fig. 5 は 3 本の直動リンクにより構成し

Fig. 3 Force transformation from link to end effector

Table 1 Calculation of condition numbers for the Stewart platform

*Stewart platform						
$r_b=300., r_h=150., p_h=(0.,0.,600.)^T$			[unit: mm]			
* Transposed Jacobian in the work coordinates J^T *						
-0.3441	0.0000	0.3441	0.3441	0.3441	0.0000	
0.1987	-0.3974	0.1987	-0.1987	-0.1987	0.3974	
0.9177	0.9177	0.9177	0.9177	0.9177	0.9177	
11.91	0.00	-11.92	-11.92	11.92	0.00	
-6.882	13.76	-6.882	-6.882	-6.882	13.76494	
5.960	5.960	5.960	-5.960	-5.960	-5.9604	
* Singular values of the transposed Jacobian *						
23.84	23.84	14.60	2.248	0.6883	0.6883	
*** C = 34.64						
* Singular values of the transposed Jacobian-sub1 *						
2.248	0.6883	0.6883	*** Cf = 3.266			
* Singular values of the transposed Jacobian-sub2 *						
23.84	23.84	14.60	*** Cm = 1.633			

た3自由度パラレルリンク機構の構成図である。ベース部のリンク結合位置は同一円周上とし、エンドエフェクタでは1点で結合されるものとする。リンク配置を表すパラメータを α とし、エンドエフェクタでの発生力 f を考察する。エンドエフェクタの位置を $p_h=(0,0,h)^T$ 、ベース部の半径を r_b とすると、 $J_f=[z_1 z_2 z_3]$ となり、この行列を特異値分解することにより C_f が求まる。

Fig. 6は α を0から π まで変化させた時の特異値を示したものである。図から明らかなように、 $p/r_b=1.0$, 2.0, 3.0と変化させた時、いずれの場合も $\alpha=2\pi/3$ で C_f は最小となっている。これより、3自由度の場合のベース部における最適なリンク配置は正三角形の頂点上上であることがわかる。

Fig. 5 Configuration of a general 3 DOF parallel link manipulator

Fig. 4 Configuration of Stewart platform

4.2 6自由度マニピュレータの統合

6本のリンク配置は、最適3自由度機構を出発点として議論を始める。すなわち、ベース部及びエンドエフェクタ上で正三角形の頂点上に各々2本のリンクを配置し、一方を **Fig. 7** に示すように同一円周上で角度 α だけ離して配置する。このパラメータ α はリンクとベース部、リンクとエンドエフェクタとの結合点が相対的にどれだけ離れているかを表すものである。ベース部の半径を r_b 、エンドエフェクタの半径を r_h とし、 $p_h=(0,0,h)^T$, $R=I_3$ として J^T を計算し、 C, C_f, C_m を求める。

(i) 角度 α による評価

Fig. 8はエンドエフェクタ上での結合位置を変化させた時の評価指数の様子を示したものである。ここで、 $r_b=300\text{mm}$, $r_h=300\text{mm}$, $h=300\text{mm}$ である。 C, C_m は $\alpha=\pi/2$ の時に、また C_f は $\alpha=\pi$ でそれぞれ最小値となることがわかる。一方、**Fig. 9**はベース上の結合位置を変化させた時の評価指数を示したものである。この場合も、先の場合と同様に、 C, C_m は $\alpha=\pi/2$ の時に、また C_f は $\alpha=\pi$ でそれぞれ最小値となっている。この理由は、同一リンクのベース部とエンドエフェクタとの

Fig. 6 Condition number vs. angle α

2つの結合点が、エンドエフェクタを中心として相互に離れているほど x, y 方向に力が発生しやすいことと、 $\alpha = \pi/2$ の時に x, y 軸回りのモーメントが発生しやすいことによる。スチュワートプラットフォームの場合は $\alpha = \pi/3$ であるから、この機構が本評価指数に関しては最適でないことがわかる。

(ii) r_h/r_b による評価

次に、ベース部とエンドエフェクタの大きさに関して評価する。 $r_b = 300\text{mm}$ として一定とし、 r_h を変化させることにより評価指数を計算した。 $h = 300\text{mm}$ とし、 r_h/r_b について評価指数を計算した結果が Fig. 10 である。

(iii) 実現可能な機構

(i)(ii)の結果より、6自由度マニピュレータの統合

Fig. 7 Configuration of a general 6 DOF parallel link manipulator

Fig. 9 Condition numbers vs. angle α at the end effector

を行なうと次のようになる。(i)の結果より $\alpha = \pi/2$ とした時、実際には隣り合うリンク同士が干渉するため、マニピュレータとしては実現不可能となる。そこで、実現可能な機構としては、Fig. 11 に示すように、隣り合うリンクのベース部とエンドエフェクタとのそれぞれの結合点をオフセットを設けて配置する方法が考えられる。これによりリンク間の干渉を容易に回避することが可能となる。また、 r_{h1}/r_{b1} と r_{h2}/r_{b2} は (ii) の結果に応じて定めればよい。

5. 性能評価と考察

提案する実現可能なマニピュレータは3章で示した評価指数をパラメータ α に関して最適となるように結合したものであるが、エンドエフェクタの動作により隣り合うリンク間で干渉が生じる可能性がある。また、リンク間にオフセットを設けたことにより評価指数が劣化する恐れもある。このような観点から、モデルを用いて提案するマニピュレータの評価指数と動作領域についてスチュワートプラットフォームと比較して評価を行なう。比較に用いるマニピュレータの仕様を Table 2 に示す。ただしここでは、 r_{h1}/r_{b1} の値は 4.2(ii) で示した指標

Fig. 8 Condition numbers vs. angle α at the base platform

Fig. 10(a) Condition numbers vs. ratio r_h/r_b when α is $\pi/2$

Fig. 10(b) Condition numbers vs. ratio r_h/r_b when α is $\pi/2$ (enlarged for lower left of Fig. 10 a)

Table 2 Specification of the Stewart platform and the proposed manipulator

	Stewart platform	Proposed
link range (outer)	736. - 497.	757. - 528.
(inner)		737. - 491.
rh (outer)	110.	110.
(inner)		80.
rb (outer)	225.	225.
(inner)		135.
interference distance	5.	5.

(mm)

にはしたがっていない。リンクの長さやレンジは、エンドエフェクタが $R=I_3$ の時に $p_h=(0, 0, 460)^T$ [mm] と $p_h=(0, 0, 710)^T$ [mm] の間を動作できるように設定されている。また、リンク間の干渉距離はリンクの直径を 5mm と仮定して定めてある。

Table 3 に比較した結果を示す。動作領域については、エンドエフェクタの方向を $R=I_3$ と固定し、与えられた位置から逆運動学を解き、各リンクがレンジ内にあり、かつ干渉が起らないかを検証することにより求めている。表に示すように、提案する機構ではこの動作領域がスチュワートプラットフォームより 28% 減少している。方向に関する動作範囲については、エンドエフェクタの位置を $p_h=(0, 0, 595)^T$ [mm] と固定し、roll, pitch, yaw を独立に変化させることにより方向行列 R を与え、逆運動学を解いて検証することにより求めている。roll

Fig. 11 Configuration of the proposed parallel link manipulator

動作が 50% 減少するが、pitch と yaw 動作はほぼ同一である。

一方、条件数はエンドエフェクタの位置・方向によって変化するの、動作領域内の平均値を比較している。計算方法としては、動作領域内の 10mm 立方の格子点に相当する位置、おおよそ 2600 点での値を平均化した。この結果、提案機構では C_f が 15% 改善され、 C_m が 7% 改善されている。

なお、パラレルリンクマニピュレータでは roll 方向の角度が動作領域に大きな影響を与えている。Table 4 は提案機構における、roll 角度に対する動作領域の大きさと、各条件数を求めたものである。動作領域は roll 角のレンジ中央に近い値で大きくなっている。したがって、最大値で比較すれば動作領域の減少は 23% となっている。一方、 C_f は roll 角の大きい値で、 C_m は roll 角 0° で最小となるが、これは 4.2(i) の考察と同じ理由によるものである。

6. 結 論

本論文では、パラレルリンク機構をマニピュレータに適用するために、その運動学と静力学を考察し、シリアルリンク機構と対比してマニピュレータとしての性能を明らかにした。さらに、エンドエフェクタで発生する力

Table 3 Comparison results of workspace and condition numbers

	VOLUME	CONDITION NO.			ORIENTAIONAL RANGE					
	(10^3 cm^3)	C	Cf	Cm	ROLL (deg)	PITCH (deg)	YAW (deg)			
Proposed	31.9	378.	4.22	2.32	-87.	20.	-60.2	65.5	-59.0	55.5
Stewart platform	45.0	385.	4.94	2.49	-127.	127.	-74.6	54.8	-59.7	59.7

Table 4 Workspace and condition numbers vs. roll angle

Roll (deg.)	-30.	-25.	-20.	-15.	-10.	-5.	0.	5.	10.	15.
Volume(10^3cm^3)	33.5	34.1	34.4	34.3	33.9	33.0	31.9	30.4	28.7	27.2
*1	32.9	35.4	37.9	40.6	42.9	44.4	45.0	- *2	-	-
C	378.	379.	380.	380.	380.	378.	378.	376.	374.	374.
*1	398.	396.	394.	391.	389.	387.	385.	- *2	-	-
Cf	4.61	4.55	4.49	4.42	4.35	4.28	4.22	4.15	4.10	4.05
*1	4.84	4.90	4.94	4.96	4.97	4.95	4.94	- *2	-	-
Cm	2.67	2.56	2.47	2.41	2.36	2.32	2.32	2.32	2.34	2.39
*1	2.70	2.65	2.61	2.57	2.53	2.50	2.49	- *2	-	-

*1 upper: proposed mechanism, lower: Stewart platform

*2 The Stewart platform has symmetry in terms of roll angle.

やモーメントができるだけ様になるような機構を解析し、新たなパラレルリンクマニピュレータの機構を提案した。提案する機構はスチュワートプラットフォームと比較して、動作領域は若干狭まるものの、力とモーメントの等方性を改善するものである。

今後の課題としては、動作領域と発生力の等方性の両者を考慮した、より一般的な最適化が必要と考えられる。また、提案機構を実際に実現する場合は、リンク間の干渉回避が容易に行なえるような制御アルゴリズムの開発も重要な課題である。

本研究は主に著者が科学技術庁原子力関係海外留学制度により米国 MIT 滞在中に行ったものである。本研究を行う機会を与えて頂いた MIT トーマス・シェリダン教授、並びに熱心に御討論頂いたコーネル大学サムエル・ランズバーガー助教授、Systemantics 社ジャガナ・ラジャー博士に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom", Proc. Instn. Mech. Engrs. 1965-66, Vol. 180-1-15, pp. 371-378, 1965-1966.
- 2) Landsberger, S., "Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator", MIT MS thesis in Mechanical Engineering, 1984.
- 3) 津坂, 福泉, 井上, "パラレルマニピュレータの設計と機構特性", 日本ロボット学会誌, Vol.5-3, pp. 180-188, 1987.
- 4) 船橋, 堀江ほか, "6自由度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), Vol.56-523, pp. 829-834, 1990.
- 5) Clavel, R., "DELTA, a fast robot with parallel geometry", Proc. Int. Symposium on Industrial Robots, pp. 91-100, 1988.
- 6) 町田, 戸田ほか, "宇宙マニピュレータ用スマート効果器の試作", 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 391-392, 1989.
- 7) Dubowsky, S. et al., "An analysis and experimental program to develop control algorithms for mobile manipulators", Prep. Ro Man Sy 88, pp. 461-468, 1988.
- 8) Hara, A. et al., "Synthesis of parallel micromanipulators", Trans. ASME, Jounl. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.111, pp. 34-39, 1989.
- 9) Hudgens J.C. and D. Tesar, "A Fully-Parallel Six Degree-of-Freedom Micromanipulator. Kinematic Analysis and Dynamic Model", Proceedings of the 20th ASME Mechanisms Conference, pp. 29-37, 1988.
- 10) Abel, E. et al., "Nuclear telerobotics and dextrous controllers", Proc. IEEE Intl. Workshop on Intelligent Robots and Systems, Vol.1, pp. 363-371, 1990.
- 11) Fichter, E.F., "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction", The International Journal of Robotics Research, Vol.5-2, pp. 157-182, 1986.
- 12) Nanua, P. et al., "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform", Trans. IEEE Robotics & Automation, Vol.6-4, pp. 438-444, 1990.
- 13) Sugimoto, K., "Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means of Motor Algebra", Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.109, pp. 3-7, 1987.
- 14) Merlet, J., "Parallel Manipulator: Kinematics, Singular Configurations and Compliance", Proceedings of '87 International Conference on Advanced Robotics, pp. 125-135, 1987.
- 15) Arai, T. et al., "Development of a Parallel Link Manipulator", Proceedings of the Fifth International Conference of Advanced Robotics, Vol.1, pp. 839-844, 1991.
- 16) Salisbury, J.K. and J.T. Craig, "Articulated Hands: force Control and Kinematics Issues", Int. Jounl. Robotics Research, Vol.1-1, pp. 4-17, 1982.

新井健生 (Tatsuo ARAI)

1952年生。1975年東京大学計数工学科卒業。1977年同大学院工学系修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所入所。以来知能ロボット、マニピュレータの機構と制御等の研究に従事。現在同所ロボット工学部自律制御課長。1986年東京大学工学博士。1986年～87年MIT客員研究員。1988年本学会論文賞授賞。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE、JIRA等の会員。(日本ロボット学会正会員)