

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	パラレルマニピュレータの運動伝達性を考慮した機構総合に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	武田行生
Author(English)	YUKIO TAKEDA
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第2824号, 授与年月日:1995年12月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第2824号, Conferred date:1995/12/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

パラレルマニピュレータの
運動伝達性を考慮した機構総合
に関する研究

武 田 行 生

目 次

第 1 章	緒論	
1・1	研究目的	(1)
1・2	従来の研究	(5)
1・3	本論文の構成	(12)
第 2 章	パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性の評価	
2・1	緒言	(14)
2・2	連結連鎖から出力節に力のみが作用する機構の運動伝達指数	(14)
2・3	連結連鎖から出力節にモーメントが作用する 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構の運動伝達指数	(16)
2・3・1	3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構	(16)
2・3・2	運動伝達指数	(17)
2・4	運動伝達指数と対偶作用力の関係	(20)
2・4・1	3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構	(20)
2・4・2	6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構	(24)
2・4・3	3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構	(27)
2・5	運動伝達性を考慮した作業領域	(31)
2・5・1	3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構	(31)
2・5・2	6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構	(33)
2・5・3	3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構	(35)
2・6	結言	(40)
第 3 章	パラレルマニピュレータ機構の特異点解析	
3・1	緒言	(41)
3・2	パラレルマニピュレータ機構の特異点解析	(42)
3・2・1	パラレルマニピュレータ機構の特異点	(42)
3・2・2	特異点の算出に関する考察	(44)
3・3	スチュワートプラットフォームの特異点解析	(48)
3・4	特異点近傍の評価	(52)
3・4・1	出力変位誤差	(52)
3・4・2	発生力の等方性	(53)
3・4・3	外力に対する駆動力	(55)
3・4・4	特異点近傍と実用作業領域	(55)
3・5	結言	(57)
第 4 章	ロボット機構の出力の空間的等方性の評価	
4・1	緒言	(58)
4・2	空間的等方性を考慮した力および速度の拘束条件式	(58)

4・3	最大全方向発生力・モーメントおよび 最大全方向発生並進速度・角速度の決定	(59)
4・4	動力伝達指数	(61)
4・5	3 自由度平面機構の評価	(64)
4・6	結言	(74)
第 5 章	モンテカルロ法に基づく機構総合	
5・1	緒言	(75)
5・2	独立峰領域の抽出	(76)
5・3	総合対象機構の運動伝達指数の算出式	(78)
5・3・1	総合対象の機構	(78)
5・3・2	機構定数	(81)
5・3・3	逆変位解析	(82)
5・3・4	静力学解析およびヤコビ行列	(82)
5・3・5	運動伝達指数の算出式	(84)
5・4	6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性に 優れた機構定数領域の抽出	(85)
5・4・1	問題の設定	(85)
5・4・2	計算結果	(86)
5・5	6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構の総合	(94)
5・6	結言	(98)
第 6 章	6 自由度空間パラレルマニピュレータの試作および駆動実験	
6・1	緒言	(99)
6・2	試作マニピュレータ	(99)
6・2・1	機構系の構成	(99)
6・2・2	制御系の構成	(103)
6・3	位置繰返し精度の評価	(104)
6・3・1	実験方法	(104)
6・3・2	実験結果	(107)
6・4	位置決め時間および伝達動力の評価	(113)
6・4・1	実験方法および評価方法	(113)
6・4・2	実験結果	(114)
6・5	結言	(118)
第 7 章	結論	(119)
	参考文献	(123)
	謝辞	(129)

記号表

本論文で用いられる主な記号は次の通りである．ここに示す意味以外で使用される記号およびここに示されていない記号は本文中に説明されている．

A	機構定数
B	機構定数
C	機構定数，または行列の条件数
E	縦弾性係数
$e_{O,\max}$	入力変位誤差による出力角変位誤差の最大値
$e_{P,\max}$	入力変位誤差による出力並進変位誤差の最大値
F	出力節に働く外力
f	対偶作用力，または駆動力
$f_{F,\max}$	外力として力のみが働く場合の最大対偶作用力
$f_{M,\max}$	外力としてモーメントのみが働く場合の最大対偶作用力
g	重力加速度
$J_{i,j}$	第 j 連結連鎖の第 i 対偶点
$[J]$	ヤコビ行列
$[J_F]$	連結連鎖に働く力をこれにより出力節上の点 P に発生する力に変換する行列
$[J_M]$	連結連鎖に働く力をこれにより出力節に発生するモーメントに変換する行列
$[J_O]$	ヤコビ行列 $[J]$ の回転成分に対応する部分行列
$[J_P]$	ヤコビ行列 $[J]$ の並進成分に対応する部分行列
l_B	スチュワートプラットフォームにおける連結連鎖の長さの最小値
M	出力節に働く外力モーメント
m_a	負荷質量
$m_{F,\max}$	外力として力のみが働く場合の最大対偶作用モーメント
$m_{M,\max}$	外力としてモーメントのみが働く場合の最大対偶作用モーメント
N	機構の自由度
N_C	乱数による発生機構数
N_E	抽出点の数
N_{EP}	独立峰領域に含まれる抽出点の総数

$O - XYZ$	静止座標系
P	出力節に伝達される動力
$P_{I,\max}$	マニピュレータの最大入力動力
p	設計変数
$P - x_P y_P z_P$	出力節上の点 P を原点とする出力節上に固定された動座標系
PI	機構の評価指数
PI_A	PI の許容値
R	静止対偶の配置円半径
RP	位置繰返し精度
r	出力節上の対偶の配置円半径
r_k	第 k 位の独立峰領域の広がり円の半径
r_{τ_F}	最大全方向発生力
r_{τ_M}	最大全方向発生モーメント
r_{ω_V}	最大全方向発生並進速度
r_{ω_Ω}	最大全方向発生角速度
S	作業領域の面積
S_P	独立峰領域の面積の総和
T	目標位置決め時間
$T_{\min}$	最小位置決め時間
T_S	実現位置決め時間
TI	運動伝達指数
TI_A	運動伝達指数の許容値
TI_{limit}	特異点近傍を表す運動伝達指数の境界値
$TI_{\min}$	作業領域内の TI の最小値
TI_P	独立峰領域内に含まれる抽出点の $TI_{\min}$ の最大値
t	時間
V	出力節の並進速度
(X_P, Y_P, Z_P)	出力節上の点 P の $O - XYZ$ 上の座標
α_i	連結連鎖 i における圧力角
β	静止節上または出力節上の対偶の位置および方向を定める角

η	動力伝達指数
θ_i	第 i 連結連鎖の入力変位
$\dot{\theta}_i$	第 i 連結連鎖の入力速度
θ_y	出力節の姿勢角
θ_z	出力節の姿勢角
κ_P	伝達動力の評価指数
κ_T	位置決め時間の評価指数
σ	行列の最大特異値
τ	アクチュエータの発生力
τ_A	アクチュエータの最大発生力
φ	出力節の姿勢角
ψ	機構定数, またはジョイントの回転角
ω	アクチュエータの発生速度
ω_A	アクチュエータの最大発生速度
Ω	出力節の角速度
Ω	出力節の瞬間回転軸

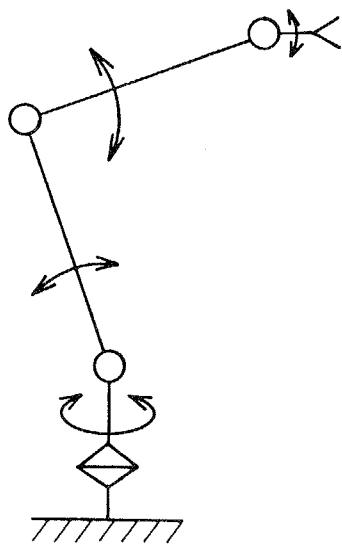
第1章 緒 論

1・1 研究目的

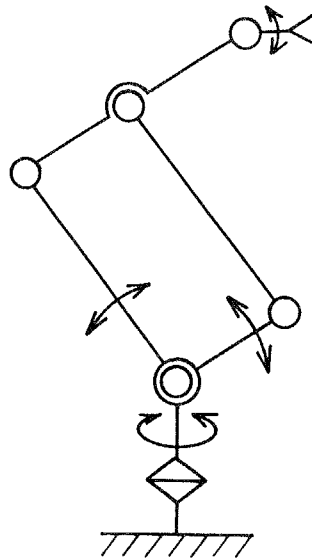
現在，第二次産業におけるマテリアルハンドリング，組立，溶接，塗装等に幅広く普及しているいわゆる産業用ロボットは，その基本的な性能においてほぼ完成の域に達していると言われている．しかし，今後ロボットはこのような作業の自動化・省力化のさらなる追求のために用いられるだけではなく，人間の緻密な感覚に基づく位置の微調整や高速組立，自由曲面等で構成される複雑形状物体の成形加工等の従来とは比較にならないほどの精度，速度，出力，剛性が要求される高度な作業へ適用されることが強く要請されている．ロボットのこのような高性能化は多機能性，柔軟性，汎用性が主に求められてきた従来形ロボットの単なる改良のみによっては実現し得ないと考えられる．

ここで，ロボットの基本性能を支配するその機構に着目してみる．現存する産業用ロボットは図 1.1(a) に示すような各関節にアクチュエータを配置したシリアル機構を用いたものが主流であり，高剛性化を図る場合には例えば図 1.1(b) のように一部に平行クランク機構を含む機構が用いられている程度であり，これらはその登場以来形状がほとんど変わっていない．この機構技術の進歩の遅延が現在および将来のロボット技術における一つの大きな問題として浮かび上がってくる．本来，図 1.1 に示したような既存の機構以外にも数多くのロボット機構の形式があるはずであるが，機構設計者は従来にはない形式の機構の設計にはほとんど取り組んでこなかったといっても過言ではない．従来は既存の機構のマイナーチェンジによってある程度の性能向上を図ることができたが，今までに比べて格段に厳しいロボットの高性能化の要求に対応していくためには，新しいロボット機構を提案していくとともにその運動特性および力学特性の解析・評価手法ならびに設計手法をまず整備して，作業内容に最も適した機構を選択・設計することを可能にしなければならない．そこで本研究では，近年ロボットマニピュレータ等への適用が期待されているパラレルメカニズム^{(1),(2)}をとりあげ，その運動学的および力学的特徴に基づいた機構設計法を確立することを目的とする．

パラレルメカニズムを適用したマニピュレータはパラレルマニピュレータと呼ばれる．パラレルマニピュレータ機構の代表例を図 1.2 に示す．同図 (a) は出力節が三つの連結連鎖により支持された 3 自由度平面機構であり，一般に静止節上の対偶 $J_{1,i}(i = 1, 2, 3)$ が駆動対偶である．同図 (b) は出力節が六つの連結連鎖により支持される 6 自由度空間機構であり， $J_{1,i}J_{2,i}(i = 1, 2, \dots, 6)$ の間の直進対偶が駆動対偶であって，一般にスチュワー

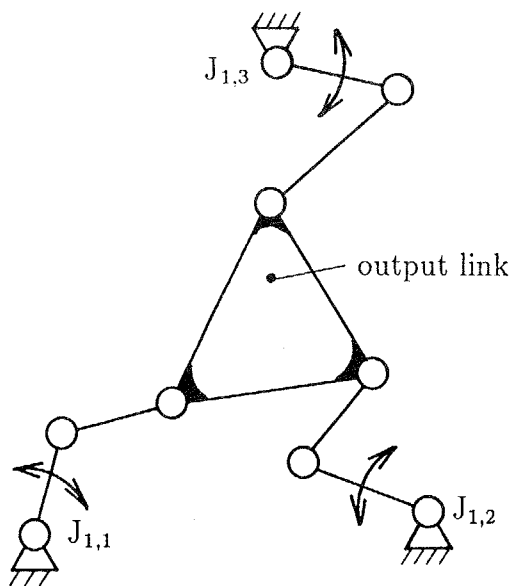


(a) シリアル機構

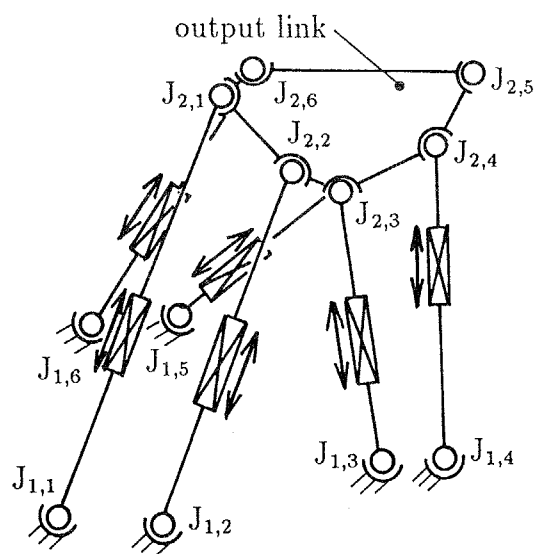


(b) 平行クランク機構を含む機構

図 1.1 現在の産業用ロボット機構の例



(a) 3 自由度平面機構



(b) 6 自由度空間機構

(スチュワートプラットフォーム)

図 1.2 パラレルマニピュレータ機構の例

トプラットフォーム⁽³⁾と呼ばれる。このようなパラレルメカニズムの大きな特徴として、図 1.2 に示した機構からもわかるとおり、

- (1) 出力節が複数の連結連鎖で支持されていること
- (2) アクチュエータをすべて静止節またはその隣接節に配置することが可能であること
- (3) 受動対偶が多く存在すること

の 3 点があげられる。出力節が複数の連結連鎖で支持されていることにより、パラレルマニピュレータにおいては、各連結連鎖およびアクチュエータは出力節負荷を分担して受けるので、全負荷が全アクチュエータに作用するシリアルマニピュレータに比べてはるかに軽量の構造および小容量のアクチュエータの採用が可能である。さらに、アクチュエータをすべて静止系に配置することにより、可動部の一層の軽量化および高速化が図られ、同時にアクチュエータ、減速機およびこれらの周辺部センサの密封ならびに動力線、信号線の収納が容易となる。そして、アクチュエータが並列配置であるからシリアルマニピュレータのように出力運動にアクチュエータの誤差が蓄積されることはない。ところで、パラレルマニピュレータ機構においては、並列に配置された所要の数のアクチュエータから入力を与えられると、複数の閉ループ連鎖の運動学的拘束に基づき間接的に出力節へ伝達され、その出力運動は機構の運動学的拘束とアクチュエータの運動の組合せにより決定される。したがって、受動対偶の組合せによって機構の運動学的拘束条件を多様に変化させ得るので、機構の大きさを変えなくても機構諸元を適切に設定することによりアクチュエータの速度と出力速度の比(ヤコビ行列)を零から無限大の間で変化させることが可能であるから、バラエティーに富んだ機構設計が可能である。この特長は、ヤコビ行列がアクチュエータの回転軸と出力点(エンドエフェクタ)間の距離によって決定されるシリアルマニピュレータでは有し得ない。また、パラレルメカニズムにおいては、受動対偶として多自由度対偶の採用が可能であるから、各連結連鎖内の節数を少なくすることができ、逆運動学解析が容易となるばかりでなく、出力節の微小運動に対して機構全体の形状がシリアルメカニズムのように大きく変化しないことも閉ループ機構の特徴により生まれる大きな長所である。さらに、受動対偶として回転対偶および球対偶を採用すれば、出力節負荷のモーメントを各連結連鎖の引張・圧縮力により受けることが可能となり、機構の高剛性化をより一層図ることができる。パラレルメカニズムはシリアルメカニズムに比較して以上のような運動学的および力学的長所を有しているが、これらの長所を活かしたパラレルマニピュレータを開発するためには多くの課題

を解決しなければならない。

パラレルマニピュレータにおいては、上述のようにアクチュエータの入力が機構の運動学的拘束に基づき間接的に出力節に伝達され、その機構の運動学的および力学的特性は各節の寸法により著しく変化する。また、パラレルマニピュレータ機構は節数が多く、多数の閉ループが存在するので順運動学演算がきわめて困難であって、さらに機構の運動学的評価指数等は複雑でありシリアルマニピュレータ機構のように機構定数と入力変位の関数で陽に表現することは一般に困難である。したがって、運動特性および静力学特性に優れたパラレルマニピュレータ機構の設計は、従来のシリアルマニピュレータ機構の設計と同様の方法により行うことができない。すなわち、パラレルマニピュレータの運動特性および静力学特性を支配する機構の運動伝達性を評価して、大域的最適機構の設計を行わなければならない。また、パラレルマニピュレータ機構にはシリアルマニピュレータ機構と異なり、出力運動が定まらず制御不能となり入力源に過大負荷のかかる特異点が存在する。この特異点はマニピュレータ運用上きわめて危険であるから確実に回避しなければならない。機構設計時には実用可能な作業領域の特異点による縮小を考慮しなければならない。さらに、所要の作業に最適なマニピュレータを開発するためには、パラレルマニピュレータ機構とともにシリアルマニピュレータ機構等の異形式機構とも比較してその性能を定量的に評価しなければならない。このためには、ロボット機構の形式・寸法に関係なく統一的に適用可能な機構評価量を開発する必要がある。また、連結連鎖が多いので実用可能な作業領域を確保するために連結連鎖間の干渉問題を解決しなければならない。

そこで本研究では、連結連鎖が直列であり、各連結連鎖内の入力節が一つであるパラレルマニピュレータを対象として、パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性の評価を行い、特異点の具体的な位置の算出法を開発するとともに、高速・高負荷作業に適したロボット機構設計のための、機構の形式・寸法に依存しない機構評価量を提案し、大域的な最適機構の総合を行ってパラレルマニピュレータ機構の設計を可能とする。そして、具体的にパラレルマニピュレータを設計・試作して種々の条件における位置決め制御実験を行って高精度・高速の位置決めが可能であることを示す。

1・2 従来の研究

本節では、本研究に密接に関連する機構の運動伝達性、特異点、運動特性、静力学特性およびそれらを考慮した機構総合ならびにロボット機構の性能評価に関する従来の研究について概観し、本研究の位置づけを明確化する。なおここでは、機構の特異点、運動特性および静力学特性に関する研究については、対象をパラレルマニピュレータ機構に限定せず、閉ループ多自由度機構に広げて議論する。

機構の運動伝達性について述べる。平面4節機構の運動伝達性の評価には H.Alt⁽⁴⁾が提案した伝達角あるいは圧力角が広く用いられ、また舟橋と小川⁽⁵⁾は中間節から出力節へ力のみが作用する空間4節機構について圧力角を運動伝達性の評価基準とした。渡辺と舟橋⁽⁶⁾は静止節と原動節を含む5節閉回路が二つ存在する平面6節機構の運動伝達性の評価には H.Alt の伝達角では不十分な場合が生じることを指摘し、この機構の機構定数の微小変化による出量変化に着目して運動伝達指数を提案した。一般の空間機構では中間節から出力節に力とモーメントが同時に作用するので、伝達角や圧力角をこのような機構の運動伝達性の評価にそのまま適用することはできないので、C.Bagci⁽⁷⁾は中間節から出力節に作用する力とモーメントそれぞれが出力として得られる力とモーメントに寄与する割合で定義される四つの伝達指数を定義した。G.Sutherland と B.Roth⁽⁸⁾は空間機構の出力節に伝達される動力に着目した伝達指数を提案し、下嶋ら⁽⁹⁾はこの伝達指数の適用範囲の拡大を図った。そして、M.J.Tsai と H.W.Lee⁽¹⁰⁾は中間節から出力節へ作用する力とモーメントを表すスクリュウを一般化して表し、これに基づく伝達指数を可操作指数とともに提案しているが、これらの指数は上記の文献(4)～(9)に示されている伝達角、圧力角および伝達指数が無次元量であるのに対して次元を有している。以上の機構の運動伝達性に関する研究は1自由度機構を対象としたものであり、パラレルメカニズムのように多自由度機構の運動伝達性に関する研究はほとんど行われていない。

パラレルマニピュレータ機構を含む閉ループ多自由度機構の特異点については多くの研究がある。K.H.Hunt⁽¹¹⁾はスクリュウ理論に基づいて特異点における機構の幾何学的性質について考察を加えるとともに、スチュワートプラットフォーム⁽³⁾と3自由度平面機構について特異点の具体例を示した。J.P.Merlet⁽¹²⁾はグラスマン幾何学に基づくパラレルマニピュレータ機構の特異点解析法を提案し、従来知られていないものも含めて具体的な特異点を示した。C.Gosselin と J.Angelos⁽¹³⁾は機構のヤコビ行列を二つに分け、閉ループ多自由度機構の特異点を三つに分類することを提案し、3自由度平面機構、3自由度球

面機構およびスチュワートプラットフォームについて特異点の具体例を示した。杉本⁽¹⁴⁾は、機構の変位解析式からヤコビ行列を導き、これをもとにして機構の特異点を定義・分類する手法を示し、スチュワートプラットフォームが特異点となる条件の例を示した。K.H.Hunt と E.J.F.Primrose⁽¹⁵⁾は、特殊な条件を満たすスチュワートプラットフォーム形 6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構について、順運動学解の数を求める手法を示し、複数の順運動学解の一致点を特異点であるとした。J.Sefrioui と C.M.Gosselin⁽¹⁶⁾は、3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構の特異点の集合を曲線としてヤコビ行列式をもとにして解析的に示し、具体例を示した。これら以外にも、ヤコビ行列⁽¹⁷⁾⁻⁽²²⁾、機構の速度関係式⁽²³⁾、スクリュウ理論⁽²⁴⁾、グラスマン幾何学⁽²⁵⁾、静的な力の釣合い⁽²⁶⁾により、いくつかのパラレルマニピュレータ機構の特異点解析が行われ、具体例が示されている。以上のように、閉ループ多自由度機構の特異点についての従来の研究は、機構が特異点となるための数学的条件や幾何学的条件を示してその条件を満足する点を例示しているにすぎず、機構設計時や運用時に必要な特異点の具体的な位置を把握するための方法や特異点近傍における機構の運動学および力学的特性は明らかにされていない。

機構の運動特性および力学的特性の解析・評価およびこれらの特性を考慮した機構総合に関する従来の研究は、つぎのとおりである。運動特性に関して、D.C.H.Yang と Y.Y.Lin⁽²⁷⁾は、2 自由度平面パンタグラフ機構の作業領域を定式化して、作業領域に関する最適設計を可能とするチャートを作成した。A.Bajpai と B.Roth⁽²⁸⁾は、2 自由度平面 5 節機構をとりあげ、節長が作業領域の大きさに及ぼす影響を解析して設計指針を与えた。C.Gosselin と J.Angles^{(19),(29)}は、3 自由度球面パラレルマニピュレータおよび 3 自由度平面パラレルマニピュレータをとりあげ、それらの作業領域の最大化とヤコビ行列の等方化を考慮した最適設計を行った。A.Hara と K.Sugimoto⁽³⁰⁾は、精密位置決めのための 6 自由度空間パラレルマイクロマニピュレータをとりあげ、ヤコビ行列の対角化を行って入力非干渉となる機構の総合を行った。堀江ら⁽³¹⁾は、2 自由度平面 5 節ロボットアームについて対偶すきまによる出力変位誤差を僅少化する機構総合を行った。舟橋ら⁽²³⁾は、6 自由度空間パラレルマニピュレータの一形式をとりあげ、その機構定数と作業領域の関係を求め、従来の機構よりも鉛直方向に大きな変位が可能な機構を明らかにした。C.Gosselin⁽³²⁾は、スチュワートプラットフォームの幾何学的条件のみによって定まる作業領域を求める手順を示した。C.Gosselin と J.Angles⁽³³⁾は、マニピュレータ機構の最適設計を行うための指標として作業領域内のヤコビ行列の条件数(最大特異値の最

小特異値に対する比)の平均値を提案し、これによる最適設計例を3自由度の平面機構および球面機構について示した。R.Kurtz と V.Hayward⁽³⁴⁾は、冗長駆動の3自由度球面平行メカニズムのヤコビ行列の条件数、アクチュエータの発生力等を考慮した最適設計を行った。C.Gosselin と E.Lavoie⁽³⁵⁾は、3自由度球面平行マニピュレータの入力変位誤差による出力変位誤差の等方性を考慮した最適設計を行った。R.S.Stoughton と T.Arai⁽³⁶⁾は、6自由度空間平行マニピュレータのヤコビ行列の等方性と作業領域の大きさを同時に考慮した最適設計を行った。V.Kumar⁽³⁷⁾は、平行マニピュレータについて到達可能な領域と任意の姿勢をとり得る領域を求め、さらにどのような姿勢をとっても特異点とならない領域を定義し、これを3自由度平面平行マニピュレータについて例示した。K.H.Pittens と R.P.Podhorodeski⁽³⁸⁾は、スチュワートプラットフォームのヤコビ行列の条件数をもとにした最適設計を行った。H.Zhuang と Z.S.Roth⁽³⁹⁾は、スチュワートプラットフォームの幾何学的特徴に基づく新しいキャリブレーション法を提案し、シミュレーションによる検討を加えた。M.Ouerfelli と V.Kumar⁽²¹⁾は、2自由度球面5節機構をとりあげ、そのヤコビ行列の条件数をもとにして最適設計を行った。

機構の静力学特性に関して、遠山と高野⁽⁴⁰⁾は、2自由度平行リンク形機構を高速化に適した機構構造として提案し、作業領域と保持トルクの観点から最適な機構形式を選択し、実際に高速運動を実現した。H.Asada と I.H.Ro⁽¹⁷⁾は、2自由度平面5節機構をダイレクトドライブロボットアームの機構としてとりあげ、アクチュエータの発生力と速度の特性をもとにして、出力点における発生力と速度の特性を最適化するための機構設計手法を提案した。中村⁽⁴¹⁾は、閉ループを有するロボットのダイナミクス計算法を示すとともに、冗長駆動がロボットの許容負荷および応答速度の向上に寄与することを具体的に示した。舟橋ら⁽⁴²⁾は、2自由度平面パンタグラフ機構の変位および力の解析を行い、機構の任意の位置・姿勢における最大対偶作用力と節の曲げモーメントの大きさを若干数の静力学特性図としてまとめ、その特性図を利用して所要の作業領域・負荷条件を満足する機構総合を行った。立矢ら^{(43),(44)}は、2自由度平行クランク形機構について、対偶作用力および節の曲げモーメント、姿勢保持トルク、内部消費電力と機構定数の関係を定式化し、これを若干数の静力学特性図としてまとめて設計資料とすることを提案し、また2自由度平面ロボット機構の形式として、開ループ形と二つの平行クランク形機構をとりあげ、それらの静力学特性について比較を行った⁽⁴⁶⁾。新井⁽⁴⁵⁾は、6自由度空間平行マニピュレータについて、ヤコビ行列の条件数をもとに、静力学特性に優れた機構

定数を明らかにした。小菅ら⁽⁴⁷⁾は、スチュワートプラットフォームの出力節において純粋に発生できる力とモーメントを別々に考えて力の解析を行う手法を提案した。

動力学特性については、浅田とカマル⁽⁴⁸⁾は、ダイレクトドライブに適したロボットアームの機構として2自由度平面5節機構を採用し、これについてアームの慣性が姿勢によって変化せず、入力軸間の運動が無干渉化されるためのリンク長と質量分布の条件を導き、実際にロボットアームを試作して高速運動を実現した。立矢⁽⁴⁹⁾は、2自由度平行クランク形機構について、作業点の運動によって生じる動力学的效果により各入力軸に生じるトルクの変化を把握しつつ機構設計を行う方法を提案した。

また、K.J.Waldron と K.H.Hunt⁽⁵⁰⁾は、パラレルマニピュレータとシリアルマニピュレータの間の運動学および静力学の特性に関する双対性についてスクリュ理論に基づき考察を加えた。

多自由度機構の最適総合・設計法に関する研究として、赤城ら⁽⁵¹⁾はミニマックス形非線形最適化手法をパワーショベル用リンク機構の最適形状設計に適用し、また藤田ら⁽⁵²⁾は機構の形状寸法に加えて構成部材の強度等も含めた多領域最適化システムを構築して油圧ショベルの最適設計を行ったが、いずれにおいても最適化を行う設計変数の変域が狭く、得られた最適機構は初期機構の改良に過ぎない。また、多自由度機構の総合を行う際には最急降下法等の一般的な最適化法が用いられる場合が多く、このような方法では得られる機構は初期機構に依存するから、所要の作業内容に対する大域的な最適機構が総合されていない。一方、対象を1自由度機構とすれば、機構の最適総合に関する研究はいくつか見受けられる。R.E.Garrett と A.S.Hall, Jr.⁽⁵³⁾は一様乱数により発生させた機構の入出力関係をデータベースに保存し、それらの中から要求された関数関係を最も高精度に創成する機構を選び出し、多段探索により高精度化を図る総合法を開発した。T.W.Lee と F.Freudenstein^{(54),(55)}はヒューリスティック法による組合せ最適総合法を開発したが、この総合法は実現可能な機構を初期条件として必要とする。また、渡辺と舟橋⁽⁵⁶⁾は評価関数の大域的な最大値点を求めるのに有効なモンテカルロ法を利用した平面6節機構の総合法を開発した。D.A.Hoeltzel と W.H.Chieng⁽⁵⁷⁾は、平面機構の中間節曲線のニューラルネットワークによる分類結果と理想曲線の照合に基づく経路創成機構の総合法を開発した。渡辺ら⁽⁵⁸⁾は、理想曲線と一様乱数により発生させた平面多節機構の中間節曲線を照合させ、最小二乗法に基づいて最適機構を総合する手法を開発した。以上に述べた1自由度機構を対象として開発された最適総合法がパラレルメカニズムのよう

な閉ループ多自由度機構の最適総合に適用された例は見受けられない。

以上のように、従来の研究においては、2 自由度平面機構についてはその運動学および力学的特性解析が詳細に行われ、機構総合に関してもいくつかの研究成果があるが、3 自由度以上の平面機構、球面機構および空間機構については、その特性が十分に把握されておらず、単なる最適設計解の例示にとどまっている。さらに、これらの最適設計において用いられている評価量は、閉ループ機構であることの特徴がほとんど考慮されておらず、従来のシリアルマニピュレータ機構の設計に用いられているものとの差異がほとんどない。したがって、所要の運動学および力学的特性を有する多自由度閉ループ機構の設計のための特性評価法ならびに機構総合法はほとんど明らかにされていない。

パラレルマニピュレータ機構の特性解析および設計を難しくしている原因の一つに、その順運動学解析の困難さがある。これに関して、数多くの研究発表がなされた⁽⁵⁹⁾⁻⁽⁸²⁾が、6 自由度空間機構に関しては一形式の機構についてもいまだに一般解が得られていない。また、これらの研究によって得られた結果は、特殊な条件を満足する機構に関する順運動学解析の一つの未知数に関する高次多項式方程式への帰着であって、複数存在する解の種類の判別等の機構の設計および運用時における重要な問題点が全く解決されていない。このように、パラレルマニピュレータ機構の真の意味での順運動学解析は現状では未解決であると言える。したがって、パラレルマニピュレータ機構の解析および総合は逆運動学に基づいて行わなければならない。すなわち、順運動学解析に基づくシリアルマニピュレータ機構の解析・設計とは異なる逆運動学解析に基づく新たな機構解析・設計法を確立しなければならない。

パラレルメカニズムの適用に関しては次の研究がある。D.Stewart⁽³⁾は、6 自由度空間パラレルメカニズムをフライトシミュレータに適用することを提案した。H.McCallion と P.D.Truong⁽⁸³⁾は、スチュワートプラットフォームを精密位置決めを行う組立用作業台に適用することを提案した。広瀬と梅谷^{(84),(85)}は、エネルギー効率の観点からパンタグラフ機構を歩行機械の脚機構に適用することを提案し、これを適用した4足歩行機械を開発した。I.E.Sutherland と M.K.Ullner⁽⁸⁶⁾は、2本の油圧シリンダにより並列駆動される脚機構を提案し、これを用いた6足歩行機械を開発した。S.M.Song ら^{(87),(88)}は、6足歩行機械に適用するためのパンタグラフ機構の総合を行い、これに基づいて6足歩行機械を開発した。J.C.Hudgens と D.Tesar⁽⁸⁹⁾は、高精度な位置合わせと微妙な力制御が可能なマイクロマニピュレータに適用するための回転入力6自由度空間機構を提案した。

N.G.Dagalakis ら⁽⁹⁰⁾は、ワイヤロープにより駆動される造船用 6 自由度空間パラレルロボットを開発した。D.R.Kerr⁽⁹¹⁾は、スチュワートプラットフォーム 形の 6 軸力センサを設計した。K.J.Waldron ら⁽⁹²⁾は、ロボットの手首の先にとりつけられる微細な運動を行う 3 自由度マイクロマニピュレータを開発した。K.M.Lee と S.Arjunan⁽²⁵⁾は、 piezo アクチュエータにより駆動される 3 自由度空間マイクロマニピュレータを開発した。広瀬⁽⁹³⁾は、階段歩行時の階段と脚の間の干渉回避とエネルギー効率の観点から、並列駆動される脚機構を提案し、これを適用した 4 足歩行機械を開発した。また広瀬⁽⁹⁴⁾は、3 自由度空間パラレルメカニズムを壁面移動ロボットの脚機構に適用することを提案し、これを用いた 4 足壁面移動ロボットを開発した。V.Hayward ら⁽⁹⁵⁾は、マスタースレイブ マニピュレータの遠隔操作装置やコンピュータグラフィックスの入力装置に用いる受動ハンドコントローラにスチュワートプラットフォーム形 6 自由度空間パラレルメカニズムを適用するための設計を行った。Z.Geng と L.S.Haynes⁽⁹⁶⁾は、スチュワートプラットフォームを用いた振動絶縁装置を開発した。M.D.Bryfogle ら⁽⁹⁷⁾は、マスタースレイブ マニピュレータシステムのテレオペレーション用の 6 自由度空間パラレルメカニズムを適用したハンドコントローラを開発した。町田⁽²²⁾は、3 自由度空間パラレルメカニズムを用いた宇宙用スマート効果器を開発し、その有効性を実証した。内山⁽⁹⁸⁾は、ダイレクトドライブ 6 自由度空間パラレルロボット HEXA を試作し、そのロボットによる高速作業を実現した。本間⁽⁹⁹⁾は、6 自由度空間パラレルマニピュレータを掘削ロボットに適用した。また、パラレルメカニズムを適用した宇宙用可変構造トラスマニピュレータについても多くの研究がなされている⁽¹⁰⁰⁾⁻⁽¹⁰³⁾。以上のように、パラレルメカニズムはマニピュレータ以外の分野にも適用されつつあるが、適用に際しては機構の最適総合がほとんど行われておらず、従来の機構の寸法をそのまま用いたり、また適用した結果の達成性能が数値的に示されているものはごくわずかであり、パラレルメカニズムのもつ能力が十分に評価されていない。

ロボット機構の性能評価に関する従来の研究は主に、入力速度と出力速度を関係づけるヤコビ行列に基づいて行われた。吉川⁽¹⁰⁴⁾は、ヤコビ行列式に基づいて可操作度を提案した。M.J.Tsai と Y.H.Chiou⁽¹⁰⁵⁾は、ジョイントの可動範囲を考慮した可操作度を提案した。内山⁽¹⁰⁶⁾は、ヤコビ行列式を用いてロボットアームの機構評価を行うことを提案した。J.K.Salisbury と J.J.Craig⁽¹⁰⁷⁾はヤコビ行列の条件数によりロボットハンドの機構評価を行った。橋本⁽¹⁰⁸⁾は、ヤコビ行列の特異値の調和平均値をマニピュレータの性

能評価指標として提案した。M.Y.Lee ら⁽¹⁰⁹⁾は、ヤコビ行列の列ベクトルのなす角を用いた指数を提案した。以上の可操作度等⁽¹⁰⁴⁾⁻⁽¹⁰⁶⁾は、シリアルメカニズムおよびパラレルメカニズムに共通した特異点ではその数値が零になり、パラレルメカニズムの特異点ではその数値が無限大あるいは不定となるため、これらを異形式の機構の運動特性の比較に用いる際にはかなりの経験と工夫を要する。また、これらは次元の異なる並進速度と角速度が不用意に同等に扱われている有次元量であるため、単位のとり方によりその数値が異なる。可操作度以外の評価量⁽¹⁰⁷⁾⁻⁽¹⁰⁹⁾についても、次元を有していたり、並進速度と角速度が不用意に同等に扱われているといった問題点がある。条件数の無次元化のために、ヤコビ行列を出力節の並進速度と角速度に関連する二つの部分に分け、それぞれの行列の条件数を求めることが提案されている⁽⁴⁵⁾が、条件数では、出力節において発生可能な最大速度が異なっても、すなわち出力節の速度の出しやすさが異なっても、条件数の数値が同じであれば同じ運動特性を有すると評価される問題がある。以上のように、ロボット機構の形式、寸法に関係なく統一的に適用可能な評価量は、いまだ提案されておらず、機構を駆動するアクチュエータの特性も含めた評価は全く行われていない。

上述のように、パラレルマニピュレータ機構に関して多くの研究が行われてきたが、多自由度閉ループ連鎖の特性を真に活用したマニピュレータを得るためには、さらに機構の運動伝達性の評価ならびにパラレルマニピュレータ機構の特異点の高速算出を可能とし、多くの異形式の機構についてアクチュエータの特性まで考慮に入れた機構特性を評価して最適機構の総合を行う必要がある。

1・3 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。

第1章 緒論

第2章 パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性の評価

パラレルマニピュレータの設計時の機構総合および運用時の軌道計画における機構の運動伝達性の評価を可能とする。まず、パラレルマニピュレータ機構における運動伝達性の評価指数として、機構の幾何学的条件のみで定まる無次元量であること、従来の1自由度機構の運動伝達性の評価指数とできるだけ類似していること、パラレルマニピュレータ機構の特異点の解析に適用可能であること、の条件を満足する運動伝達指数を、入力節から出力節へ伝達される動力に着目して提案する。次に、提案した指数の有効性について外力に対する対偶作用力の大きさの観点から具体的に検討を加える。さらに、運動伝達性を考慮した作業領域を具体的に解析し、検討を加える。

第3章 パラレルマニピュレータ機構の特異点解析

パラレルマニピュレータ機構の特異点の位置を高速に算出することを可能とするとともに、特異点近傍における運動学的および静力学的特性を明らかにする。まず、パラレルマニピュレータ機構の特異点を運動伝達指数により定義し、この特異点の具体的な位置の高速算出法として運動伝達指数とヤコビ行列式の符合を組合わせた手法を提案するとともに、この手法を代表的な6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の特異点の位置の算出に適用して検討を加える。つぎに、出力変位誤差、出力節に発生する力の大きさとその等方性の観点から、特異点近傍を運動伝達指数の数値により定義し、作業領域から特異点近傍を除いた実用作業領域を求めることを可能とする。

第4章 ロボット機構の出力の空間的等方性の評価

ロボット機構の形式・寸法に関係なく統一的に適用可能な機構出力の空間的等方性に関する評価法を提案する。まず、ロボットが全方向に発生できる力とモーメントおよび並進速度と角速度に関する空間的等方性を考慮した拘束条件式を設定する。つぎに、ロボット機構の形式、寸法に関係なく統一的に適用可能な機構出力の空間的等方性に関する評価量として、設定した発生力および発生速度に関する拘束条件下において全方向に発生可能な出力動力とアクチュエータの最大発生動力の総和の比で定義される動力伝達

指数を提案する。さらに、3 自由度平面機構の評価を具体的に行い、提案した動力伝達指数の有用性について検討を加える。

第 5 章 モンテカルロ法に基づく機構総合

機構設計時において大域的な最適機構を総合することを可能とするための手法を提案し、具体的に検討を加える。まず、機構の評価指数に優れた機構定数領域 (独立峰領域) を適切に抽出するためのモンテカルロ法に基づく手法を提案する。つぎに、6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構の一形式をとりあげ、運動伝達指数を機構の評価指数としてとりあげて提案した手法により運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出を行い、従来の手法と比較を行って提案した手法の有用性を示すとともに、とりあげた機構の設計変数の固定条件が運動伝達性、独立峰の数およびその大きさに及ぼす影響について検討を加える。さらに、アクチュエータの固定部等の製作の容易さ、隣接する入力節同士の干渉および出力節の大きさ等の実用的な条件を考慮し、所要の作業領域において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機構を総合する。

第 6 章 6 自由度空間パラレルマニピュレータの試作および駆動実験

第 5 章で総合した機構を用いて実際に 6 自由度空間パラレルマニピュレータを試作して、その運動特性について実験的評価を行う。まず、試作マニピュレータの機構系および制御系を示す。つぎに、位置決め指令位置、位置決め方向、目標位置決め時間および負荷質量を種々に変えて位置決め動作を行わせたときの位置繰返し精度を調べ、試作マニピュレータが高精度な位置決めが可能であることを示す。さらに、位置決め時間および伝達動力に関する評価指数を二つ提案する。そして、位置決め距離および出力節負荷を種々に変えて軌道追従制御実験を行い、提案した評価指数により試作マニピュレータが高速・高負荷時にその位置決め時間および伝達動力において優れた特性を発揮することを示す。

第 7 章 結論

本研究で得られた結果を要約して述べる。

第2章 パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性の評価

2・1 緒言

従来のシリアルマニピュレータに比べて、高精度、高速、高負荷の作業に適したパラレルマニピュレータを開発するためには、まず入力節から出力節への運動および力の伝達性(運動伝達性)に優れた機構を総合するとともに、運用に際しては運動伝達性に優れた軌道計画を行わなければならない。このために、パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性の評価指数(運動伝達指数)を定義する。

本章では、

- (1) 機構の形式および大きさに関係なく統一的に評価可能とするために、無次元量であって数値そのものに物理的意味があること。
- (2) 機構総合時に利用可能とするために、機構の幾何学的条件のみで定まること。
- (3) 設計者に違和感を与えないために、従来の1自由度機構の運動伝達性の評価指数とできるだけ類似していること。
- (4) パラレルマニピュレータ機構の特異点の解析にも適用可能であること。

の4条件を満足する運動伝達指数を、入力節から出力節に伝達される動力に着目して、出力節を支持する各連結連鎖から出力節へ力のみが作用する機構とモーメントが作用する3自由度球面機構それぞれについて提案し、提案した指数の有効性を出力節に働く外力に対する対偶作用力の大きさの観点から検討を加える。また、運動伝達性を考慮した作業領域を具体的に求め、検討を加える。

2・2 連結連鎖から出力節に力のみが作用する機構の運動伝達指数

本節では、出力節を支持する各連結連鎖から出力節へ力のみが作用するパラレルマニピュレータ機構に対して運動伝達指数を定義する。このような機構には、第1章でとりあげた3自由度平面パラレルマニピュレータ機構^{(11),(29),(66)}、スチュワートプラットフォーム⁽³⁾の他に、舟橋らが開発した6自由度空間機構⁽²³⁾、内山、Pierrot らが開発した6自由度空間機構^{(98),(110)}など多くのものがある。ここではこれらを図2.1のようにモデル化して考える。

図2.1に示すように機構の自由度を N とし、静止節と出力節を結ぶ連結連鎖に番号 $1, 2, \dots, N$ を付す。連結連鎖 i の入力変位を θ_i として、機構入力変位を $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ で、その時間微分を $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_N]^T$ で表す。ここで、連結連鎖 i 内の入力変位 θ_i 以

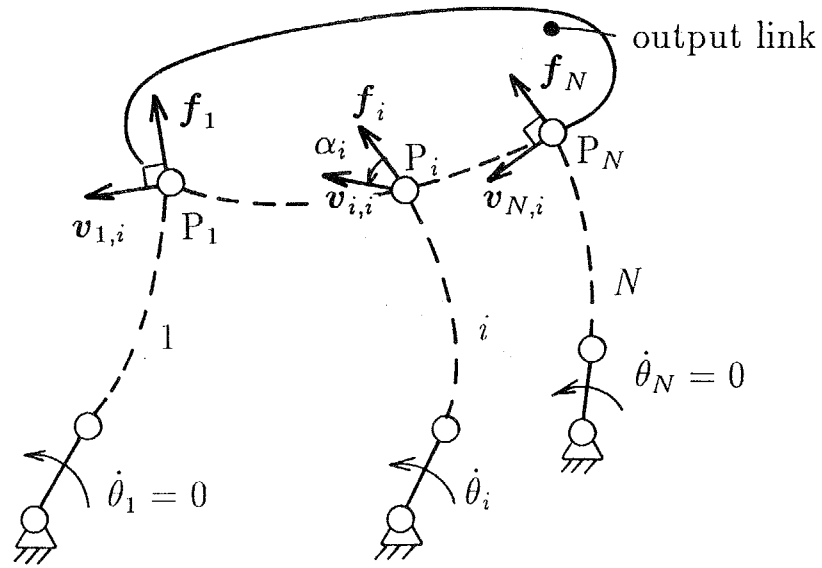


図 2.1 連結連鎖から出力節に力のみが作用するパラレルマニピュレータ機構

外の θ の成分をすべて一定とし, $\dot{\theta}_j = 0 (j = 1, 2, \dots, N, j \neq i)$ の状態を考える. このとき, $\dot{\theta}_i$ によって生じる連結連鎖 k と出力節の対偶点 P_k の速度を $v_{k,i} (k = 1, 2, \dots, N)$ と表すことにする. 一方, 対偶点 P_k における連結連鎖 k から出力節への作用力の方向は機構の形状により一意に定まり, この力ベクトルを f_k で表すことにする. このとき,

$$f_j \cdot v_{j,i} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, N, j \neq i) \quad (2.1)$$

である.

したがって, 機構内のすべての入力節を同時に駆動するとき出力節に伝達される動力 P は

$$P = \sum_{i=1}^N f_i \cdot v_{i,i} = \sum_{i=1}^N f_i v_{i,i} \cos \alpha_i \quad (2.2)$$

で表される. ここに α_i は力 f_i と速度 $v_{i,i}$ のなす角で, 連結連鎖 i のみを駆動するときの 1 自由度機構の圧力角に対応する角であり, これを連結連鎖 i での圧力角と呼ぶことにする. 式 (2.2) において, f_i は出力節の負荷により, $v_{i,i}$ は出力運動により, α_i は機構の寸法・形状により定まる. 動力 P が最大となるのは $\cos \alpha_i = 1 (i = 1, 2, \dots, N)$ のときであり, 各入力節の動力を効率的に伝達するために, ここでは $\cos \alpha_i$ の最小値を最大にすることを考える.

したがって、パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性を次式の伝達指数 TI で評価することにする。

$$TI = \min(\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \dots, \cos\alpha_N) \quad (2.3)$$

TI は 0 ～ 1 の間で変化する無次元量であり、 TI が大きいほど運動伝達性に優れ、 $TI = 0$ のとき機構は特異点となり、運動を行うことはできない。以上のように式 (2.3) で定義される TI は、緒言で述べた運動伝達性の評価指数に要求される (1)～(4) の条件を満たしており、パラレルマニピュレータの機構設計時や運用時に有効な指数になると考えられる。なお、 $TI = 0$ となるパラレルマニピュレータ機構の特異点については、第 3 章において論じる。

2・3 連結連鎖から出力節にモーメントが作用する

3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構の運動伝達指数

本節では、図 2.2 に示す回転対偶のみからなる 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構を具体的にとりあげ、この機構の運動伝達指数を定義する。

2・3・1 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構

対象とする 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構は、図 2.2 に示すように静止座標系 $O - XYZ$ の原点 O を中心とする同心球上に配置された入力節 $J_{1,i}, J_{2,i} (i = 1, 2, 3)$ および中間節 $J_{2,i}, J_{3,i}$ からなる連結連鎖と出力節からなる。この機構は、マニピュレータの他に、ロボットマニピュレータの肩関節、歩行ロボットの股関節等への適用が考えられるが、ここではアームが出力節となる構造を考える。各対偶は回転対偶であり、対偶 $J_{1,i}, J_{2,i}, J_{3,i}$ の回転軸は原点 O を通り、これらをそれぞれ単位ベクトル U_i, V_i, W_i で表す。各入力角変位 θ_i は入力節 $J_{1,i}, J_{2,i}$ の U_i 軸まわりの回転角で各入力節が XY 平面に平行な平面内にあるときにその値が零となる角で表す。また出力節の姿勢を図 2.3 に示す角 θ_y, θ_z および φ で表し、図 2.4 に示すように $\theta_y = \theta_z = \varphi = 0$ において、出力節に固定された座標系 $o - \xi\eta\zeta$ を X 軸と ξ 軸、 Y 軸と η 軸、 Z 軸と ζ 軸が一致するように設定し、また U_1 と W_1 が XZ 平面内にあるようにする。ここで、 φ は図 2.4 に示した $\theta_y = \theta_z = \varphi = 0$ の状態から出力節が ζ 軸まわりに回転することなく静止座標系 $O - XYZ$ に対して図 2.3 の θ_y および θ_z の姿勢になった後に ζ 軸まわりに出力節が回転した角である。さらに図 2.4 に示すように、 W_2, U_2, W_3, U_3 を XY 平面上に写影したベクトル W'_2, U'_2, W'_3, U'_3 と X 軸のなす角をそれぞれ B_2, C_2, B_3, C_3 で表し、 ζ 軸と W_i および Z 軸と U_i のなす角を ψ_i および $C_{1,i}$ で表す。

また入力節および中間節の大きさを $A_{1,i} = \angle J_{1,i} O J_{2,i}$ および $A_{2,i} = \angle J_{2,i} O J_{3,i}$ で表す。

さて、3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構において、出力節と各連結連鎖の対偶点 $J_{3,i} (i = 1, 2, 3)$ には力とモーメントが同時に作用するが、これらは V_i と W_i を含む円弧の接線方向の力、 W_i 方向の力および V_i と W_i を含む平面に垂直な軸まわりのモーメントに分けられる。この機構の出力運動である点 O まわりの回転運動へのこれらの力・モーメントの効果について考えると、 V_i と W_i を含む円弧の接線方向の力は V_i と W_i を含む平面に垂直な軸まわりのモーメントと同一方向であり、 W_i 方向の力はこの出力運動に効果的に働かない。この W_i 方向の力は中間節の力のつりあいを保つために作用する。そこで、各連結連鎖から出力節へ作用する力・モーメントのうち、出力動力に関与する成分をまとめれば、 V_i と W_i を含む平面に垂直な軸まわりのモーメントとなるから、これを M_i と表すことにする。

2・3・2 運動伝達指数 三つの入力節のうちの二つの入力節 $J_{1,2} J_{2,2}$, $J_{1,3} J_{2,3}$ を固定し入力節 $J_{1,1} J_{2,1}$ のみを駆動するとき、出力節は図 2.5 に示す Ω_1 まわりに回転する。 Ω_1

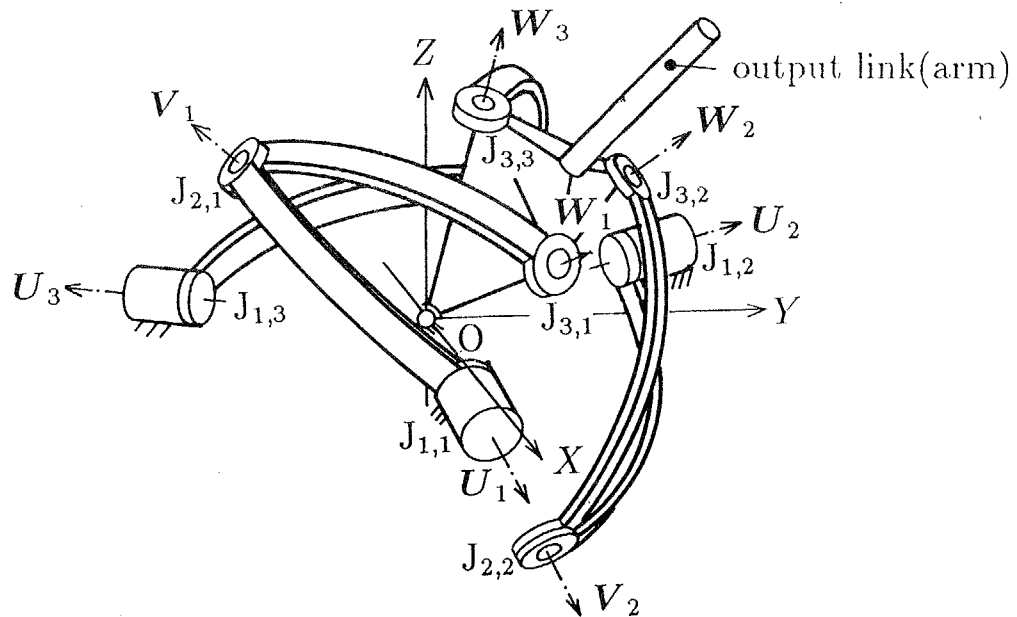


図 2.2 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構

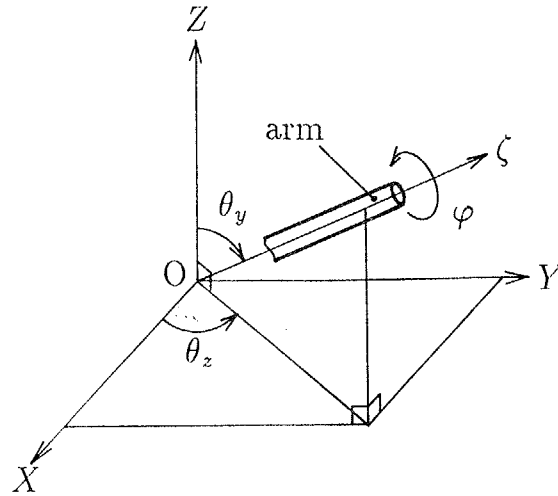


図 2.3 出力節の姿勢角の定義

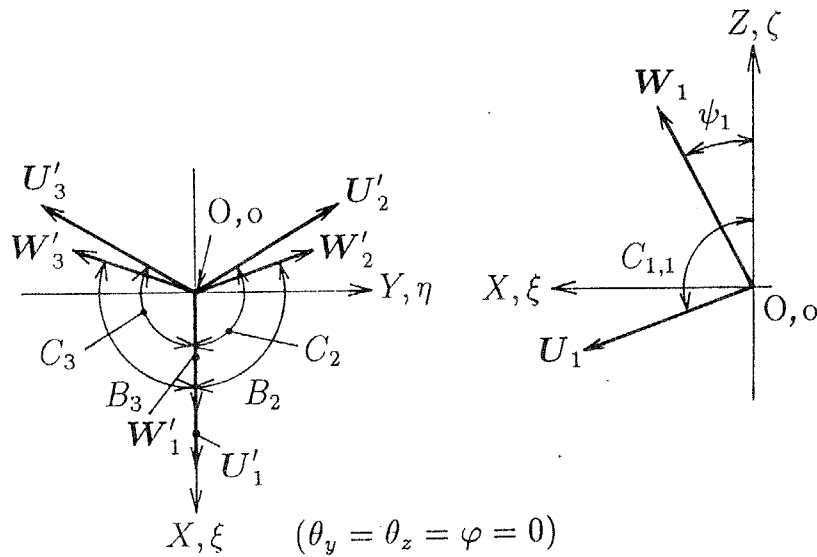


図 2.4 機構定数の定義

は次式で求められる.

$$\Omega_1 = \frac{(V_2 \times W_2) \times (V_3 \times W_3)}{|(V_2 \times W_2) \times (V_3 \times W_3)|} \quad (2.4)$$

他の二つの入力節をそれぞれ単独に駆動する場合の出力節の瞬間回転軸 Ω_2, Ω_3 も同様に求められる.

ここで、中間節から出力節へ作用するモーメント M_i のうち瞬間回転軸 Ω_i まわりの成分の大きさを $M_{e,i}$ で、出力節の Ω_i まわりの角速度を ω_i と表せば、すべての入力節を同時に

駆動するとき出力節へ伝達される動力 P は次式で表される.

$$P = \sum_{i=1}^3 \omega_i M_{e,i} \quad (2.5)$$

中間節 $J_{2,i}J_{3,i}$ を含む平面に垂直な軸と Ω_i のなす角を図 2.5 のように α_i と表せば, 式 (2.5) は次式となる.

$$P = \sum_{i=1}^3 \omega_i M_i \cos \alpha_i \quad (2.6)$$

したがって, 入力節から出力節へ動力を伝達する際に中間節に過大な対偶作用力・モーメントを作用させないためには, $\cos \alpha_i$ を極力大きくする必要がある. 以上より, 3 自由度球面平行マニピュレータ機構の運動伝達性を次式の伝達指数 TI で評価することにする.

$$TI = \min(\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \cos \alpha_3) \quad (2.7)$$

TI は 0 ~ 1 の間で変化する無次元量であり, TI が大きいほど運動伝達性に優れ, $TI = 0$ のとき機構は平行マニピュレータ機構の特異点となる. $TI = 0$ となるのは Ω_1, Ω_2 および Ω_3 が一致するとき, つまり各中間節を含む円弧が一点で交わるときのみであり, すべての角 $\alpha_i = \pi/2$ となってこの交点と原点を結ぶ直線まわりのモーメントが出力節に外力として作用すると機構はこれを支持できない. また, 3 自由度球面平行マニピュレ

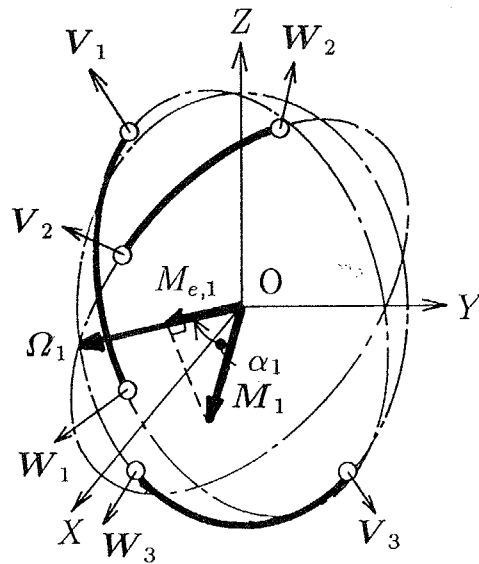


図 2.5 出力節の瞬間回転軸 Ω_1 および角 α_1

ータ機構の節の曲率半径を無限大とすれば 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構が得られ、この機構の TI を式 (2.7) から求めると、これは 2・2 節で定義した運動伝達指数 TI を 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構に適用した結果と一致する。したがって、式 (2.7) で定義される運動伝達指数 TI は 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構および 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構に共通に適用することができるものである。

2・4 運動伝達指数と対偶作用力の関係

本節では具体的な寸法を有するパラレルマニピュレータ機構において出力節に種々の外力が加わったときの対偶作用力を求め、圧力角および TI との関係について検討を加える。

2・4・1 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構

図 2.6 に示す 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構をとりあげる。節 $J_{1,i}J_{2,i} (i = 1, 2, 3)$ が入力節であり、それらの角変位を $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ で表す。出力節の位置を出力節上の点 P の静止座標系 $O - XY$ 上の位置 (X_P, Y_P) で表し、姿勢を出力節に固定された動座標系 $P - x_P y_P$ の x_P 軸が X 軸となす角 φ で表す。連結連鎖 i から出力節への作用力の方向は $\overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}}$ であり、入力 θ_i のみを動かしその他の入力を固定したときの出力節の瞬間中心 C_i を用いて圧力角 α_i を求めると同図中に示す角となる。また、この機構では出力節の位置および姿勢 (X_P, Y_P, φ) が与えられた場合図 2.7 に示す八つの逆運動学解が存在し、それぞれ運動学的、力学的特性が異なる。この逆運動学解の選択の問題については次節において述べる。

出力節の位置および姿勢を与え、出力節上の点 P に次の (1) ~ (3) の 3 通りの外力 $[F, M] = [F_X, F_Y, M]$ が働く場合を考える。ここに F_X, F_Y は外力 F の X, Y 成分、 M は XY 平面直角方向のモーメントである。

$$(1) [F, M] = [F_X, F_Y, M] = [1, 0, 0]$$

$$(2) [F, M] = [F_X, F_Y, M] = [0, 1, 0]$$

$$(3) [F, M] = [F_X, F_Y, M] = [0, 0, 1]$$

なお、ここでは F_X, F_Y, M に対する対偶作用力の大小、すなわち比を知るのが目的であるので、 F_X, F_Y, M は単位の大きさの力およびモーメントとしている。さて、逆運動学解析を行い、各対偶の位置を求めるとともに力およびモーメントのつりあいより各対偶作用力を求める。対偶 $J_{3,i} (i = 1, 2, 3)$ における対偶作用力 f_i を $f_i = f_i \bar{f}_i (|\bar{f}_i| = 1)$ で表すことにする。ここで、 f_i を上記の外力条件 (1) と (2) のそれぞれに対して求め、合

計六つの $|f_i|$ のなかの最大値を $f_{F,\max}$ と表し、条件 (3) の下での三つの f_i のなかの最大値を $f_{M,\max}$ と表す。種々の寸法を有する機構について、種々の位置・姿勢における $f_{F,\max}, f_{M,\max}$ を求め、圧力角 α_i および TI との関係調べた。

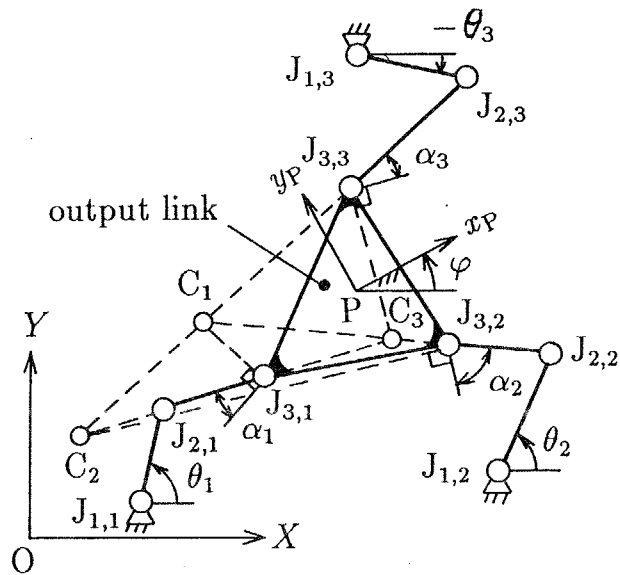


図 2.6 3 自由度平面平行マニピュレータ機構

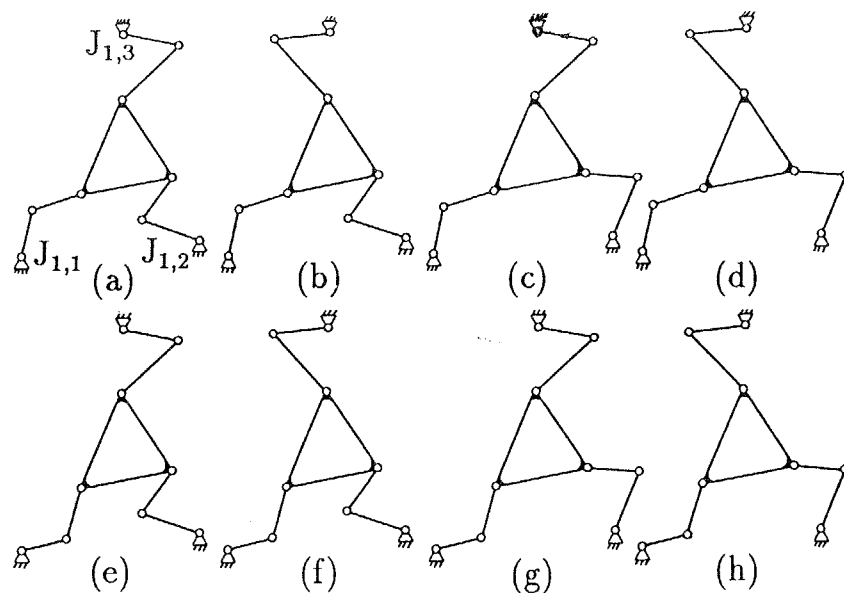
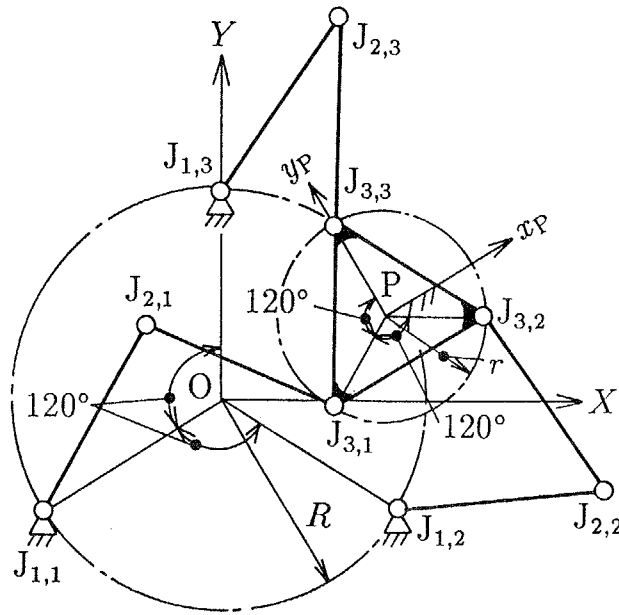


図 2.7 3 自由度平面平行マニピュレータ機構の逆運動学解の種類



$$[R = 1, r = 0.5, \overline{J_{1,i}J_{2,i}} = \overline{J_{2,i}J_{3,i}} = 1 \ (i = 1, 2, 3)]$$

図 2.8 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構

一例として、図 2.8 に示すように静止対偶 $J_{1,i}$ が半径 $R = 1$ の円上に、出力節上の対偶 $J_{3,i}$ が半径 $r = 0.5$ の円上に等間隔に配置され、 $\overline{J_{1,i}J_{2,i}} = \overline{J_{2,i}J_{3,i}} = 1$ の寸法を有する機構について、解析結果を示すことにする。出力点 P を対偶 $J_{3,i}$ を通る円の中心とし、姿勢角 φ は線分 $J_{3,1}J_{3,2}$ が X 軸となす角として、これらを次のように与えた。

$$X_P = \pm 0.2l \quad (l = 1, 2, \dots)$$

$$Y_P = \pm 0.2m \quad (m = 1, 2, \dots)$$

$$\varphi = \pm 30^\circ n \quad (n = 1, 2, \dots)$$

l, m, n は逆運動学解が存在する範囲とし、逆運動学解は図 2.8 に示すもの [図 2.7 の (c)] を採用した。なお、節長等の長さ、距離は比を表す数値である。

まず、 α_i と f_i の関係を述べる。結果の一例として $\cos\alpha_1$ と外力条件 (1), (2) の下の $|f_1|$ のうちの大きい方の数値 $f_{1,F,\max}$ および条件 (3) の下の $|f_1| (= f_{1,M,\max})$ の関係を図 2.9 に示す。同図より、 $\cos\alpha_1$ が大きくても対偶作用力は必ずしも小さくならないことがわかる。そこで、図中の $\bullet$ 印の点を取りあげて $\cos\alpha_1$ が大きいにもかかわらず、 $f_{1,F,\max}$ が大きくなる理由について検討を行うことにする。この点は $X_P = -0.4, Y_P = 1.4, \varphi = -30^\circ$ であり、 $\cos\alpha_1 = 0.8806, \cos\alpha_2 = 0.1226, \cos\alpha_3 = 0.0731$ で、 $\cos\alpha_3$ がきわめて小さい。

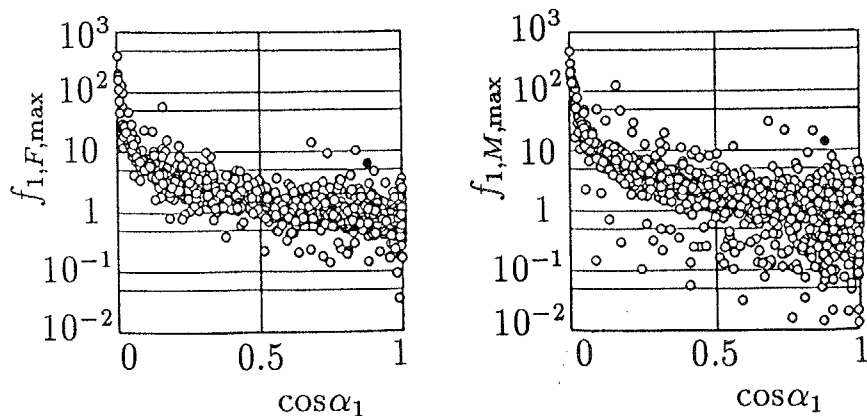


図 2.9 $\cos \alpha_1$ と $f_{1,F,\max}$, $f_{1,M,\max}$ の関係

この点における出力節の速度と対偶作用力は

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_P \\ \dot{Y}_P \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.479 & -0.963 & 0.271 \\ 3.721 & 4.180 & -6.021 \\ 8.387 & 7.766 & -11.874 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.809 & 6.281 & 14.155 \\ 1.195 & -5.187 & -9.637 \\ 0.354 & -7.851 & -15.484 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ M \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

となる。式 (2.8) および (2.9) より、点 P に Y 軸方向の負荷が加わった状態で連結連鎖 $i = 3$ のみを駆動するとき、点 P はほぼ Y 軸方向に運動し、各連結連鎖に大きな力が生じることがわかる。このとき $\cos \alpha_3$ が小さいので $|f_3|$ は大となるが、ほとんど有効な仕事に使われない。その有効に使われない力の成分は内力として出力節に加わるから、出力節における力のつりあいを保つために $|f_1|$ および $|f_2|$ も大となる。したがって、 $f_{1,F,\max}$ は $\cos \alpha_3$ が小さいために大きくなることをわかる。

次に、伝達指数 TI と最大対偶作用力 $f_{F,\max}$, $f_{M,\max}$ の関係を図 2.10 に示す。図 2.9 の場合と異なり、 TI が大きくなり 1 に近いほど対偶作用力は一様に小さくなっており、式 (2.3) で定義した TI が機構の静力学的特性をよく表していることがわかる。なお、ここで示した以外の 7 通りの逆運動学解についても、また寸法を種々に変更した機構についても同様の結果であった。

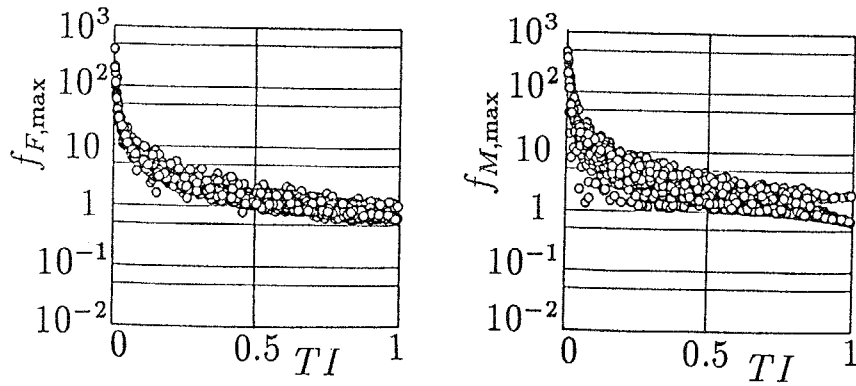


図 2.10 TI と $f_{F,\max}$, $f_{M,\max}$ の関係

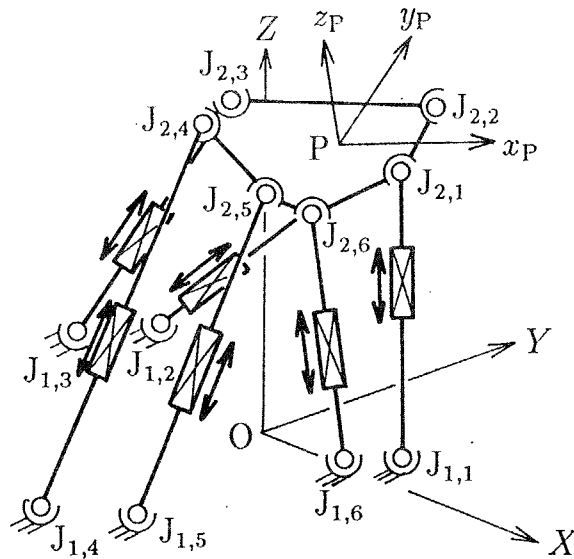


図 2.11 6 自由度空間平行マニピュレータ機構 (スチュワートプラットフォーム)

2・4・2 6 自由度空間平行マニピュレータ機構

図 2.11 に示すスチュワートプラットフォーム⁽³⁾ すなわち，各連結連鎖が球対偶で静止節と出力節に連結され，連結連鎖内の直進対偶が駆動対偶である形式の 6 自由度空間平行マニピュレータ機構を取りあげる．出力節の位置および姿勢は出力節上の点 P の静止座標系 $O-XYZ$ 上の位置 (X_P, Y_P, Z_P) と出力節上に固定された座標系 $P-x_P y_P z_P$ の $O-XYZ$ に対するロール角，ピッチ角およびヨー角 $(\varphi_R, \varphi_P, \varphi_Y)$ で表す．各連結連

鎖から出力節への作用力の方向は $\overrightarrow{J_{1,i}J_{2,i}}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) の方向であるから、圧力角 α_i は連結連鎖 i のみを駆動したときの $J_{2,i}$ の運動方向と $\overrightarrow{J_{1,i}J_{2,i}}$ のなす角となる。スチュワートプラットフォームの機構定数を図 2.12 に示すように、静止節上の球対偶点 $J_{1,i}$ の配置円半径 R 、出力節上の球対偶点 $J_{2,i}$ の配置円半径 r 、およびこれらの球対偶点の位置を決める角 $\beta_{1,i}$ および $\beta_{2,i}$ とする。

具体的に表 2.1 に示す機構定数を有する 3 種類の機構 A, B, C をとりあげる。これらの機構に対して、4 通りの出力節の姿勢

$$\varphi_R = 0^\circ, \quad \varphi_P = 0^\circ, \quad \varphi_Y = 0^\circ$$

$$\varphi_R = 30^\circ, \quad \varphi_P = 0^\circ, \quad \varphi_Y = 0^\circ$$

$$\varphi_R = 0^\circ, \quad \varphi_P = 30^\circ, \quad \varphi_Y = 0^\circ$$

$$\varphi_R = 0^\circ, \quad \varphi_P = 0^\circ, \quad \varphi_Y = 30^\circ$$

を与え、それぞれに対して

$$X_P = 0.1l \quad (l = 1, 2, \dots)$$

$$Y_P = 0.1m \quad (m = 1, 2, \dots)$$

$$Z_P = 0.1n \quad (n = 1, 2, \dots)$$

のように出力節の位置を変え、それぞれの位置・姿勢において次の 6 通りの外力 $[F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z]$ を出力節上の点 P に加えたときの $J_{2,i}$ における対偶作用力 f_i (各駆動対偶の発生力に等しい) および TI を求めた。

$$(1) \quad [F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$(2) \quad [F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z] = [0, 1, 0, 0, 0, 0]$$

$$(3) \quad [F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z] = [0, 0, 1, 0, 0, 0]$$

$$(4) \quad [F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z] = [0, 0, 0, 1, 0, 0]$$

$$(5) \quad [F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z] = [0, 0, 0, 0, 1, 0]$$

$$(6) \quad [F, M] = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z] = [0, 0, 0, 0, 0, 1]$$

ここで $\overline{J_{1,i}J_{2,i}}$ の最小値 l_B を 2 とし、各駆動対偶変位は市販直進アクチュエータを考慮してその 40 % まで得られるものとし、 $2 \leq \overline{J_{1,i}J_{2,i}} \leq 2.8$ とする。それぞれの位置・姿勢

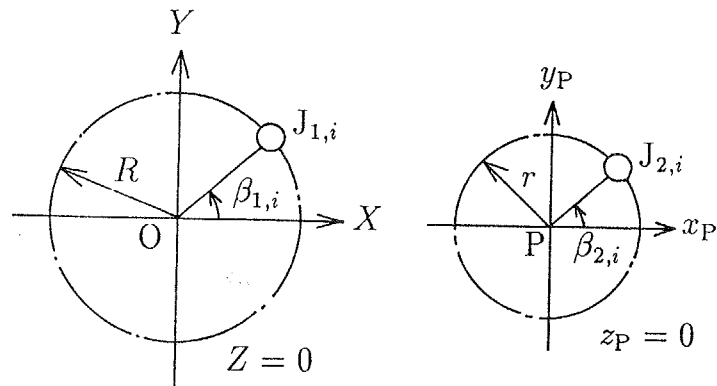


図 2.12 スチュワートプラットフォームの機構定数

表 2.1 スチュワートプラットフォームの機構定数

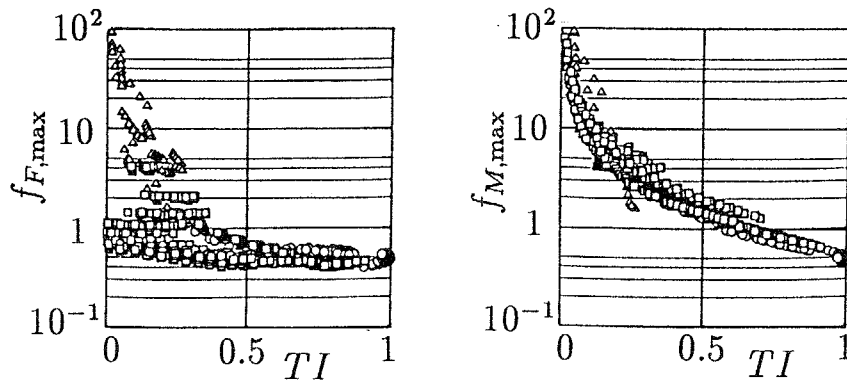
$\beta_{1,1}$	90°
$\beta_{1,2}$	90°
$\beta_{1,3}$	210°
$\beta_{1,4}$	210°
$\beta_{1,5}$	330°
$\beta_{1,6}$	330°

	Mech.A	Mech.B	Mech.C
$\beta_{2,1}$	30°	330°	0°
$\beta_{2,2}$	150°	210°	180°
$\beta_{2,3}$	150°	90°	120°
$\beta_{2,4}$	270°	330°	300°
$\beta_{2,5}$	270°	210°	240°
$\beta_{2,6}$	30°	90°	60°

R	2	r	1
-----	---	-----	---

において外力条件 (1) ~ (3) の下での 18 個の $|f_i|$ の値のなかで最大のものを $f_{F,\max}$, 条件 (4) ~ (6) の下での最大値を $f_{M,\max}$ と表す.

TI と $f_{F,\max}$ および $f_{M,\max}$ の関係を図 2.13 に示す. 同図よりいずれの機構においても TI が大きければ対偶作用力が小さくなることがわかり, TI の有用性が確認できる. また, 機構 C(図 2.13 中の □ 印) においては TI が小さくても力に対する対偶作用力 $f_{F,\max}$ は小さく, モーメントに対する $f_{M,\max}$ のみが大きい位置・姿勢が数多く存在することがわかる. このような位置・姿勢において TI の数値が小さいのは, 負荷モーメントのいず



[○ : Mech.A △ : Mech.B □ : Mech.C]

図 2.13 TI と $f_{F,\max}$, $f_{M,\max}$ の関係

れかの成分に対して対偶作用力の少なくとも一つが大きくなることに起因している。また、このような負荷モーメントと対偶作用力の比を表す数値には長さの次元があるため、機構設計時にその数値が大きいことを判断することは困難である。これに対して、 TI は無次元量であり、機構設計時の評価指数としてきわめて有効であると言える。

2・4・3 3自由度球面パラレルマニピュレータ機構

3自由度球面パラレルマニピュレータ機構の出力節に外力が作用した場合は、これにより各節には運動球面外の弾性変形が生じるが、本項ではこれを抑制する機能を連結連鎖以外の構造物にもたせることを考える。具体的には、出力節の回転中心部に球対偶を設けてその球対偶に一端が静止系に固定された支柱を取りつけた構造を考える。なお、支柱は図 2.2 において $Z < 0$ 側に存在して Z 軸を中心線とする丸棒とする。また、図 2.14 に示すように入力節と中間節を幅 w_L 、厚さ h_L 、中立軸半径 R_L 、縦弾性係数 E_L の曲がり梁、支柱を直径 d_b 、長さ l_b 、縦弾性係数 E_b の中実丸棒とし、それ以外の出力節等の部材は剛体であるとする。

機構定数ならびに出力節の姿勢を種々に変え、出力節上に外力として種々の力およびモーメントを作用させたときの対偶作用力・モーメントを次の方法により求めた。出力節、三つの入力節・中間節に関する力・モーメントの釣合いを考えると 42 個の式が得られる。一方、受動回転対偶においては回転対偶軸まわりのモーメントが、球対偶におい

では3軸まわりのモーメントが作用しないので、求めるべき対偶作用力・モーメントは合計51成分となる。したがって、出力節に外力が作用したときに各対偶に作用する力・モーメントを求めるためにはさらに9個の式が必要である。各節および支柱が弾性変形した状態において、 $J_{1,1} - J_{2,1} - J_{3,1} = 0$ 、 $J_{1,2} - J_{2,2} - J_{3,2} = 0$ および $J_{1,3} - J_{2,3} - J_{3,3} = 0$ の各経路で求めた3通りの出力節上の点oの変位 $o_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $o_2(X_2, Y_2, Z_2)$ および $o_3(X_3, Y_3, Z_3)$ と支柱のたわみによる変位 $o_b(X_b, Y_b, Z_b)$ がすべて一致するとおくことにより9個の式が得られる。これらの9個の式を先の42個の式と連立させてすべての対偶作用力・モーメントを求めた。

ここで、出力節の姿勢を固定した状態で、まず出力節に固定された座標系 $o-\xi\eta\zeta$ の原点oに ξ 、 η および ζ 軸それぞれの方向にのみ順番に大きさ F の力を作用させたときに求められる全対偶作用力・モーメントの中の最大値をそれぞれ $f_{F,\max}$ および $m_{F,\max}$ とし、次に大きさ M のモーメントを、力を作用させた場合と同様に出力節に作用させてそのときの全対偶作用力・モーメントの中の最大値を $f_{M,\max}$ および $m_{M,\max}$ として、これらの数値をその姿勢における対偶作用力・モーメントの代表値とする。

結果の一例として、表2.2の機構定数および表2.3の諸元を有する機構について、入力節と中間節の縦弾性係数を $E_L = 70.0\text{GPa}$ 、支柱の長さを $l_b = 220.0\text{mm}$ とし、支柱の縦弾性係数 E_b および直径 d_b の組を3通りに変えた場合の TI と $f_{F,\max}$ 、 $m_{F,\max}$ 、 $f_{M,\max}$ 、 $m_{M,\max}$ の関係を図2.15に示す。ここで、 $F = 1\text{N}$ とし、 M を F と同じレベルの大きさとするために節の配置円半径(約0.2m)を F に乗じて $M = 0.2\text{N}\cdot\text{m}$ とした。また、出力節の姿勢は $0^\circ \leq \theta_y \leq 180^\circ$ 、 $0^\circ \leq \theta_z \leq 360^\circ$ 、 $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ の範囲でそれぞれ 15° ごとに变化させた。同図(a)は支柱が存在しない場合を想定した場合の結果である。同図より出力節に力のみ、モーメントのみを作用させた場合のいずれの場合においても対偶作用力・モーメントは TI と無関係であることがわかる。ついで $E_b = 210\text{GPa}$ とし、 $d_b = 25\text{mm}$ と 35mm の場合の結果である(b),(c)を見ると、支柱の剛性が増すに従って出力節に力が作用する場合の対偶作用力・モーメントは小さくなり、 $d_b = 35\text{mm}$ では $TI \geq 0.15$ の領域で支柱の設置効果が著しく現れることがわかる。また、出力節にモーメントが作用する場合については、支柱の剛性を大きくすることにより、 TI の数値が大きければ対偶作用力・モーメントが小さくなるという関係が得られ、 TI により機構の静力学特性を評価することが可能となることわかる。表2.2の機構定数を有する機構においては d_b あるいは E_b をさらに大きくして支柱の剛性を大きくしても同図(c)とほぼ同様の結果が得ら

れる。また他の機構定数に対しても定性的には図 2.15 と同様の結果が得られた。

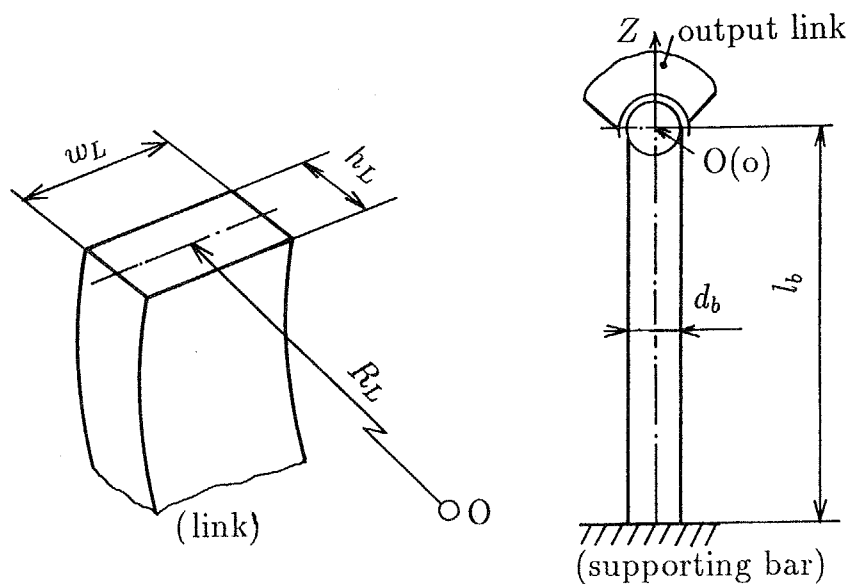


図 2.14 節および支柱のモデル

表 2.2 3 自由度球面平行ルマニピュレータ機構の機構定数

$A_{1,i}$	90°
$A_{2,i}$	90°
B_2	120°
B_3	120°
$C_{1,i}$	100°
C_2	120°
C_3	120°
ψ_i	25°
$(i = 1, 2, 3)$	

表 2.3 3 自由度球面平行ルマニピュレータ機構の入力節および中間節の寸法諸元

	input link	coupler link
R_L	186.7 mm	133.4 mm
w_L	30.0 mm	20.0 mm
h_L	29.8 mm	43.2 mm

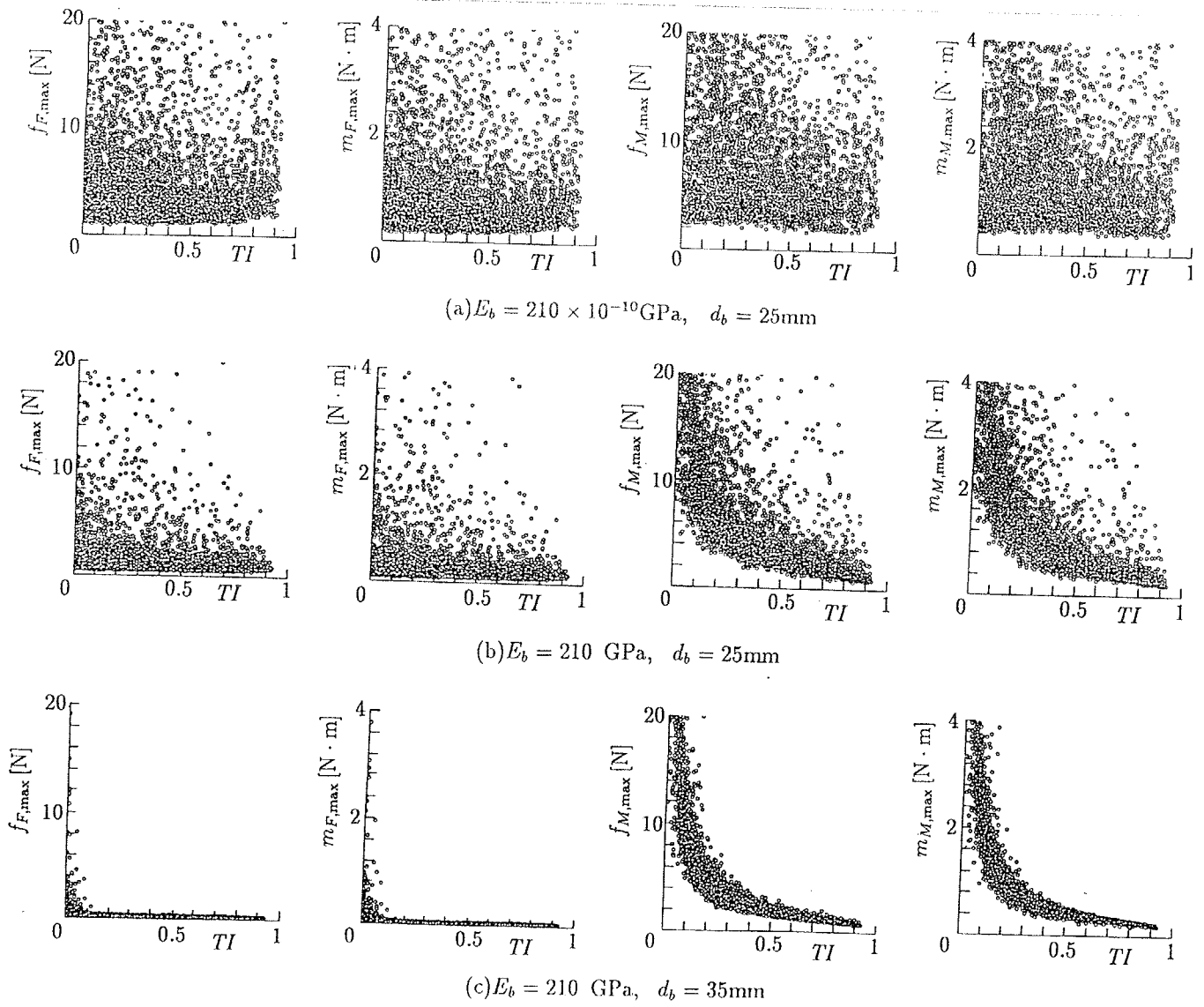


図 2.15 節の弾性変形を考慮した TI と最大対偶作用力・モーメントの関係

2・5 運動伝達性を考慮した作業領域

2・5・1 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構

図 2.8 に示す 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性を考慮した作業領域について検討を加える。姿勢角 φ を一定に保った状態で幾何学的条件のみによって定まる点 P のとり得る領域すなわち作業領域は三つの円弧で囲まれた領域となる⁽²⁹⁾。しかし、この領域の内部には特異点をはじめ、運動伝達性が劣って高精度・高速・高負荷の作業に適さない領域が存在し、実際に使用可能な領域は制限される。例えば図 2.7(a) の解について、 $\varphi = 30^\circ = \text{一定}$ としたときの作業領域と運動伝達指数 TI を求めれば図 2.16 のようになる。同図より、作業領域内の位置によって運動伝達性が大きく異なることがわかる。

ところで、圧力角の許容最大値は使用される速度と力の大きさに依存し、自動機械用のカム機構やリンク機構における圧力角の許容最大値は、出力節が揺動する板カム機構で 45° 、出力節が直線運動する板カム機構で 30° 、低次対偶からなるリンク機構では 50° とされている⁽¹¹¹⁾。マニピュレータは自動機械用のカム機構、リンク機構に比べてかなり低速度で使用されると考え、良好な運動伝達性が得られる圧力角の条件を $\max(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) = 60^\circ$ とし、本節では $TI \geq \cos 60^\circ = 0.5$ を運動伝達性の条件とする。そこで、運動伝達性を考慮し、 $TI \geq 0.5$ を満たす領域を図 2.7 に示したすべての逆運動学解に対して求め、(a),(b),(d),(h) について示せば図 2.17 の斜線部となる。ここで (c) の $TI \geq 0.5$ を満たす領域は (b) の斜線部の作業領域を原点 O 回りに -120° 、(e) は (b) を O 回りに 120° 、(f) は (d) を O 回りに 120° 、(g) は (d) を O 回りに -120° 回転させたものと同じである。また、図 2.16 の作業領域の右下の括弧内に示した数値は作業領域の面積であり、図 2.17 の括弧内に示した数値はそれぞれの斜線部の領域の面積の図 2.16 の作業領域の面積に対する比を表す。図 2.17 より、運動伝達性を考慮した作業領域の大きさは、幾何学的条件のみによって求められる作業領域よりもかなり小さく、また逆運動学解のとり方によって運動伝達性を考慮した作業領域の大きさおよび形状は大きく異なることがわかる。したがって、運動計画時には運動中常に運動伝達性の条件が満足される適切な逆運動学解を選択する必要がある。

実際に逆運動学解の選択を行う場合、現在の出力節の位置・姿勢および逆運動学解すなわち機構形状から入力節を動かすのみで所望の機構形状へ移ることが可能か否かを知る必要がある。二つの逆運動学解間の遷移が可能なのは二つの解が一致したときである。

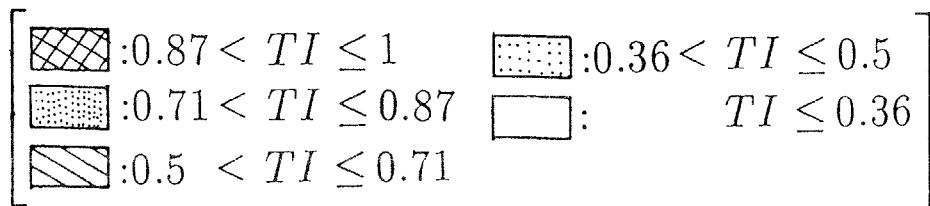
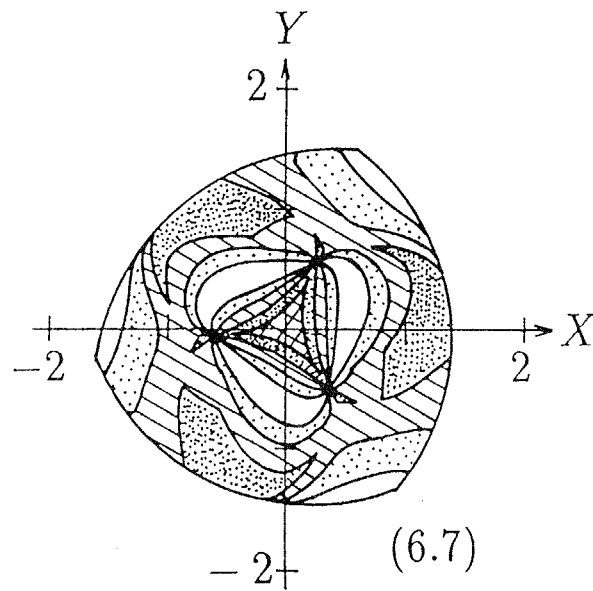


図 2.16 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の作業領域と TI

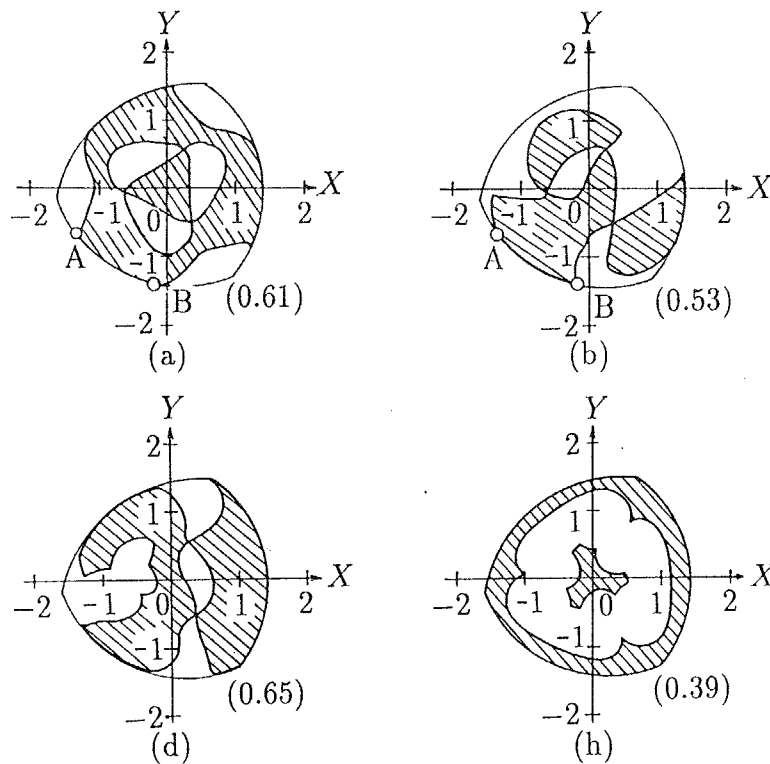


図 2.17 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の
各逆運動学解に対する $TI \geq 0.5$ の領域 (斜線部)

例えば図 2.8 の機構で図 2.7 の (a) と (b) の解間の遷移が可能なのは $J_{1,3}$, $J_{2,3}$ および $J_{3,3}$ が 1 直線となる点のうち運動伝達性の条件が満たされる点の集合つまり図 2.17(a),(b) の弧 AB となる。弧 AB 間の 1 点を通過させ解 (a) から (b) あるいは (b) から (a) へ解の遷移を行えば、この機構は $\varphi = 30^\circ$ において図 2.17 の (a) と (b) の和集合で表される領域に解 (a) あるいは (b) によって到達可能となる。また八つの逆運動学解間の遷移の可能性について検討したところ、図 2.8 の機構は図 2.16 で示した領域の任意の点から他の任意の点へ $\varphi = 30^\circ$ を保ったまま移動可能であった。

2・5・2 6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構

スチュワートプラットフォームの表 2.1 の機構 A について、 $\overline{J_{1,i}J_{2,i}}$ の最小値 l_B を種々に変え、 $l_B \leq \overline{J_{1,i}J_{2,i}} \leq 1.4l_B$ として作業領域を調べた。 $\varphi_R = \varphi_P = \varphi_Y = 0^\circ$ としたときの作業領域を $Y = 0$ で切った断面積 S の l_B に対する変化を図 2.18 に示す。ここで幾何学的な条件のみを考慮した断面積を S_G 、運動伝達性を考慮し $TI \geq 0.5$ の条件を加えたものを S_T として求め、それぞれを $(\Delta l)^2 = (0.4l_B)^2$ で除して無次元化したものを $\overline{S_G}, \overline{S_T}$ と表している。これらの $\overline{S_G}, \overline{S_T}$ は入力ストローク量 Δl が作業領域に有効に反映されているか否かを表す。図 2.18 より $l_B = 4.75$ 付近で運動伝達性を考慮した作業領域 $\overline{S_T}$ は最大となること、 $2 \leq l_B \leq 4.5$ では幾何学的条件のみで定まる作業領域 $\overline{S_G}$ 内のすべての点で運動伝達性の条件 ($TI \geq 0.5$) が満足されていることがわかる。また図 2.18 より $l_B = 1.5$ および $l_B = 5$ では $\overline{S_G}$ に対して $\overline{S_T}$ は小さいことがわかる。これは、図 2.19 に示すように $l_B = 1.5$ ではその下部の領域の、 $l_B = 5$ ではその上部の領域の運動伝達性が劣る ($TI < 0.5$) からである。

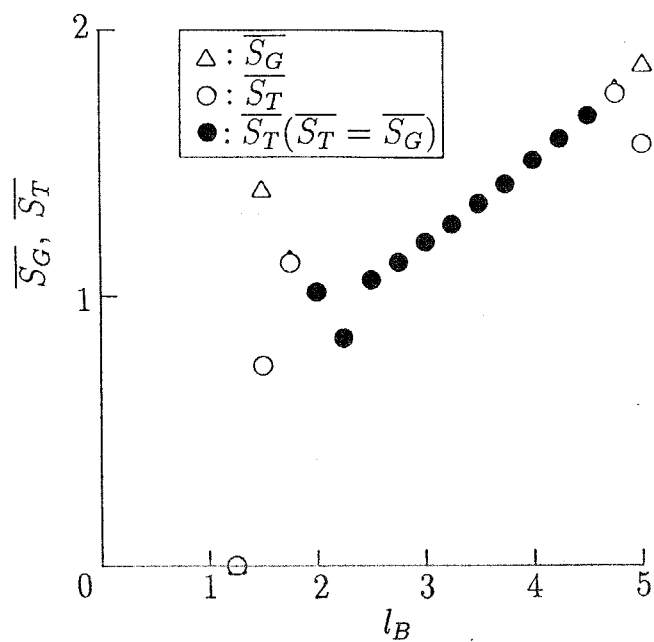


図 2.18 スチュワートプラットフォームの l_B と $\overline{S}_G, \overline{S}_T$ の関係

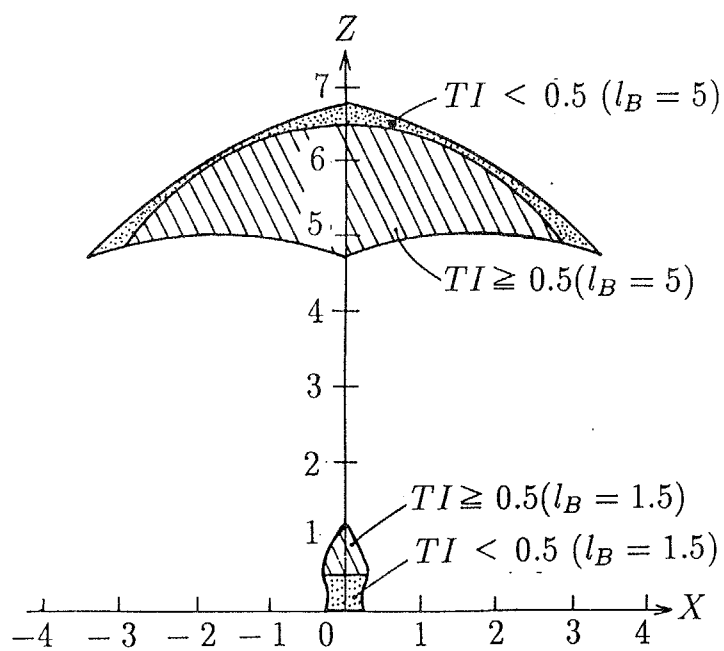


図 2.19 スチュワートプラットフォームの作業領域 ($l_B = 1.5, 5$)

2・5・3 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構

3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構の作業領域内には運動伝達性が劣る領域や節、支柱および出力アーム相互間で干渉が起こる領域があるため、良好な運動特性・静力学特性が得られしかも実際に用いることのできる作業領域はかなり制限される。しかもこの機構の作業領域は姿勢角のみで表されるから、作業領域の大きさは機構の大きさに依存しない。そこで、機構定数と作業領域内の運動伝達性が優れる領域および節等が互いに干渉し合う領域の関係を調べ、実用上有効な作業領域を有する機構定数を明らかにする。

解析の複雑化を避け、幾何学的な条件のみによって定まる作業領域を大きくすることを考え、各連結連鎖に関する機構定数を同一とし、 $A_{1,i} = A_{2,i} = 90^\circ, B_2 = B_3 = C_2 = C_3 = 120^\circ, C_{1,i} = C_{1,j}, \psi_i = \psi_j (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$ とする。以後では $A_{1,i}, A_{2,i}, C_{1,i}, \psi_i$ をそれぞれ単に A_1, A_2, C_1, ψ と表す。したがって、設計変数は C_1 および ψ である。

まず、運動伝達性が良好な領域として、ここでも $TI \geq 0.5$ の領域を採用する。また、節、支柱およびアームの相互干渉を考えるために、入力節および中間節の形状は図 2.20 に示すように定め、アームおよび支柱は十分な長さを有するそれぞれ直径が d_a, d_b の丸棒でモデル化する。さらに、機構の小形化を考慮し、機構内に多くの節の配置層を設けることを避けしかも各回転対偶の可動範囲が最大となるように、各入力節、各中間節はそれぞれ同一球面上に配置することにする。また、逆運動学解は 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の場合 (図 2.7) と同様に 8 種類存在するが、節間の干渉を考慮して図 2.2 に示す解を採用する。

ここではマニピュレータの他にロボットの肩、手首への適用も考慮し、出力アームは Z 軸まわりに一回転できしかも連続的に大きな姿勢角 θ_y が得られることが望まれると考え、 $\varphi = 0^\circ$ において θ_z が任意にとれ、任意の θ_z に対して θ_y ができる限り大きくなる機構定数を明らかにする。なおここでは各対偶の可動範囲を特に考慮しないが、各回転対偶は上述の節の層配置をとることにより一回転でき、また球対偶として市販のユニバーサルジョイント等を用いることを想定すれば θ_y は最大でも 90° 程度が限界である。節、支柱およびアームの諸元を表 2.3 および表 2.4 のように定め、 $\varphi = 0^\circ$ として、 C_1 と ψ の多数の組合せに対して運動伝達性に優れた領域と節間等の干渉が起こる領域を調べることにより、運動伝達性に優れた領域が大きく、しかもこの領域と節間等の干渉が起こる領域の共通領域が小さくなる設計変数 C_1 および ψ の組合せを探索した。

その結果、 $\varphi = 0^\circ$ においては、 $C_1 = 100^\circ, \psi = 25^\circ$ の組合せの場合に運動伝達性が良好

で節間等の干渉が起こらない実用的な作業領域が大きいことがわかった。この機構定数において $\varphi = 0^\circ$ の場合の (a) $TI \geq 0.5$ の領域, (b) 節, 支柱およびアームの間で干渉が起こる領域, (c) $TI \geq 0.5$ を満たしかつ干渉が起こらない領域を図 2.21 に示す。同図において, $90^\circ - \theta_y \geq 0^\circ$ はアームが $Z \geq 0$ の支柱が存在しない領域にあることを表し, 実用的にはこの領域が作業領域として望ましい。同図より, この機構定数を用いれば $90^\circ - \theta_y \geq 0^\circ$ の領域内の干渉がおこる領域は小さく, 干渉を考慮しない場合に $TI \geq 0.5$ を満たす (a) の領域と干渉を考慮した場合の (c) の作業領域の差はわずかであることがわかる。そして, 広く連続的な作業領域が得られ, $\varphi = 0^\circ$ を保ったままいずれの θ_z に対しても $66^\circ \sim 74^\circ$ の範囲の姿勢角 θ_y が得られることがわかる。また, この作業領域は上述した球対偶 (ユニバーサルジョイント) の可動範囲を考慮しても十分実現可能である。

さらに, φ を変えたときの (c) の領域を図 2.22 に示す。同図では, 作業領域を極座標 $R - \theta$ 系の R 軸に θ_y を, θ 軸に θ_z をとって表示している。同図より, $-40^\circ \leq \varphi \leq 0^\circ$ において比較的大きな作業領域が得られることがわかる。なお同図において, φ を正側にしたときよりも負側にしたときの方が作業領域が大きくなるのは, 中間節の間で干渉が起こりにくいためである。

以上の結果をもとにして, 表 2.2 ~ 2.4 に示す諸元を有し, 表 2.5 の諸元を有する DC サーボモータおよび減速機により駆動される 3 自由度球面パラレルマニピュレータを試作した。試作マニピュレータの概観を図 2.23 に示す。このマニピュレータの作業領域をモータを駆動・制御することにより実際に調べた。結果の一例として $\varphi = 0^\circ$ の場合について図 2.21 に実験において干渉が起こらずに実現された θ_y の最大値を○印により示す。同図より, 試作マニピュレータは理論的に求められた作業領域を実現できていることが確認できる。

表 2.4 節, 支柱およびアームの諸元

	input link	coupler link
l_j	170.0 mm	109.0 mm
d_j	50.0 mm	50.0 mm
d_a	20.0 mm	
d_b	35.0 mm	

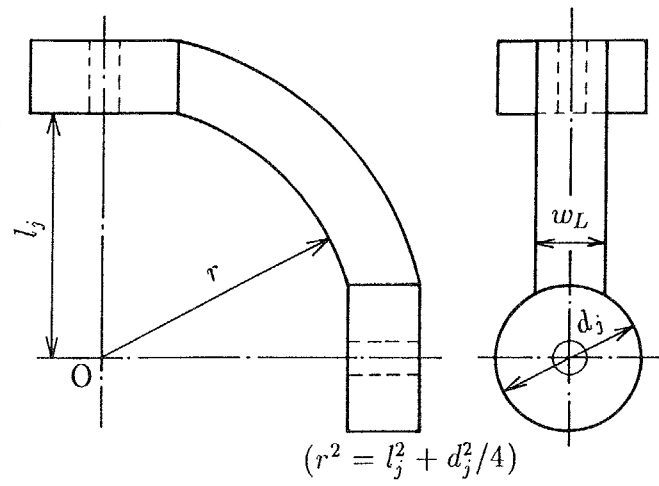
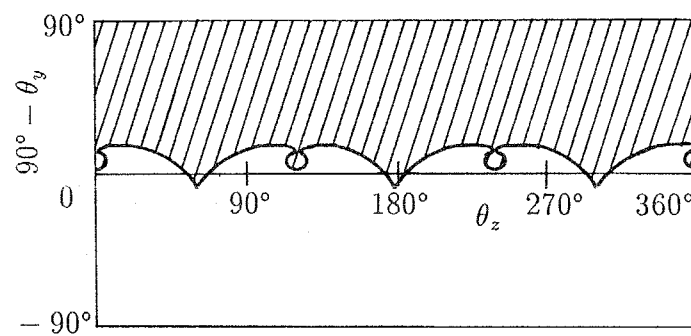
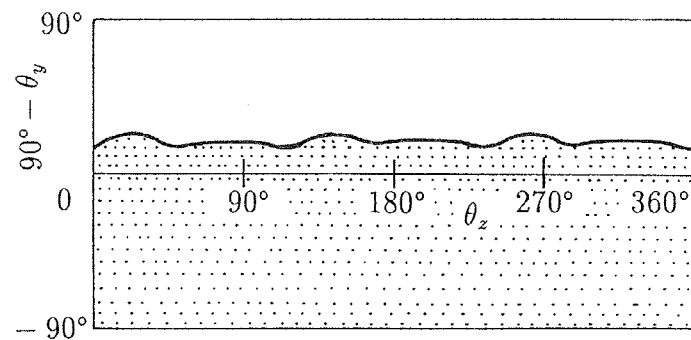


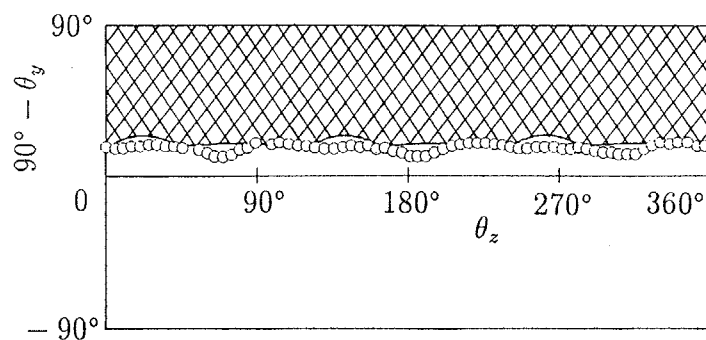
図 2.20 節の形状



(a) $TI \geq 0.5$ の領域 [//]



(b) 節間等の干渉が起こる領域 [....]



(c) $TI \geq 0.5$ かつ干渉が起きない領域 [XX]

(○:実験結果)

図 2.21 作業領域

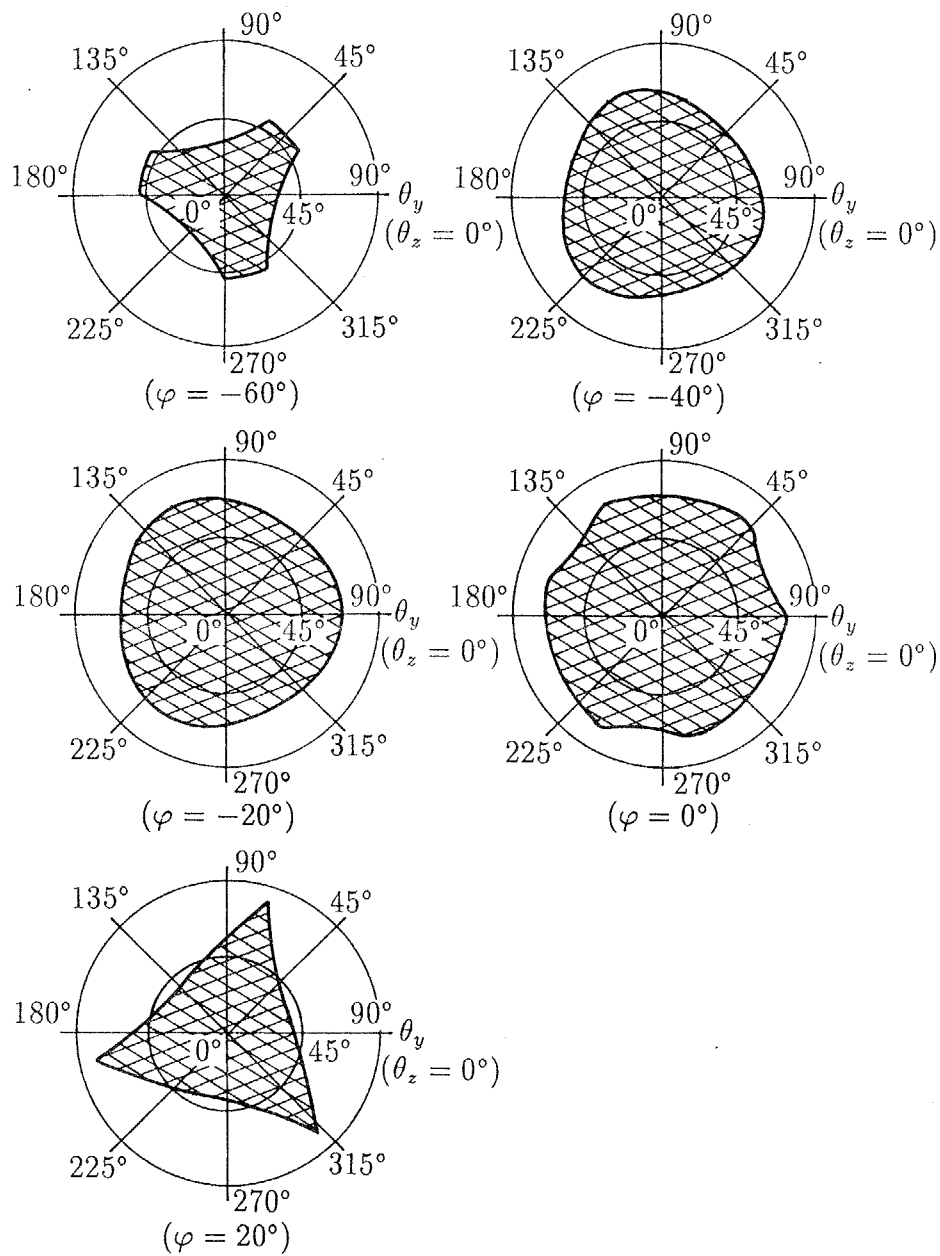


図 2.22 φ を変化させた場合の作業領域

表 2.5 駆動源の諸元

Rated Power of DC Motor	60W
Rated Torque of DC Motor	0.191 N·m
Rated Angular Velocity of DC Motor	314.2 rad/s
Reduction Ratio	1/88

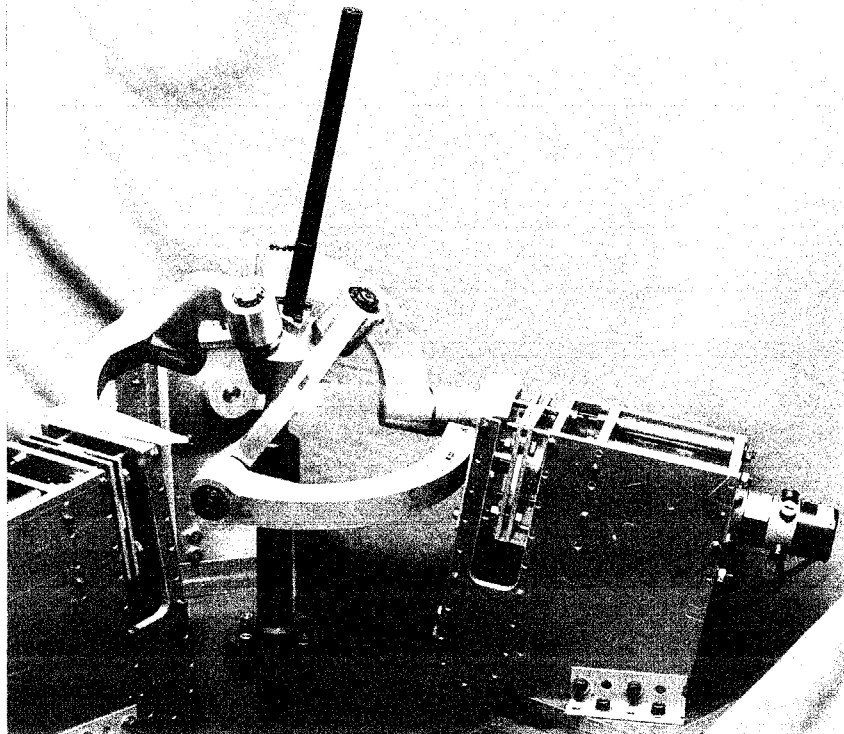


図 2.23 試作 3 自由度球面パラレルマニピュレータの概観

2・6 結言

本章では、パラレルマニピュレータ機構における運動伝達性の評価を可能とするために、入力節から出力節に伝達される動力に着目し、1自由度機構の圧力角の概念を拡張した運動伝達指数を提案した。得られた結果を要約すれば次の通りである。

(1) 出力節を支持する各連結連鎖から出力節へ力のみが作用する機構とモーメントが作用する機構について運動伝達指数 TI を定義した。これらの指数は、(i) 0～1の間で変化する無次元量である、(ii) 機構の幾何学的条件のみで定まる、(iii) 従来の1自由度機構の圧力角の概念を踏襲している、(iv) パラレルマニピュレータ機構の特異点の評価に適用できる、等の特徴をもっており、機構の総合時および運用時において有用である。

(2) 出力節に負荷として力およびモーメントが作用するときの対偶作用力・モーメントと TI の関係を具体的に調べた。その結果、 TI の数値が大きければ対偶作用力・モーメントが小さくなることがわかり、 TI の有効性が静力学的観点から確認された。

(3) パラレルマニピュレータ機構の作業領域内の運動伝達指数 TI の分布を具体的に調べたところ、 TI は出力点の位置により大きく変化すること、および運動伝達性が良好な領域は幾何学的条件のみによって定まるいわゆる作業領域に比べてかなり小さく機構定数に大きく依存することがわかった。また、逆運動学解が複数存在する機構の場合には逆運動学解の選択により作業領域の大きさおよび形状が大きく異なるので運動伝達性を考慮して適切な逆運動学解を選択する必要がある。

(4) 3自由度球面パラレルマニピュレータ機構について、運動伝達性と機構内の節等の相互干渉を考慮した作業領域の解析を行い、運動伝達性が良好でありしかも干渉が起こらない実用的な作業領域が広く連続的に得られる機構定数を明らかにした。そして、この機構からなるマニピュレータを実際に試作し、作業可能な領域を調べた。その結果、所期の作業領域が得られることが確認された。

第3章 パラレルマニピュレータ機構の特異点解析

3・1 緒言

パラレルマニピュレータ機構には大別して2種類の特異点があり、シリアルマニピュレータ機構の特異点⁽¹¹²⁾と類似の性質をもつものとそうでないものがある。図3.1に2自由度平面5節機構の特異点の例を示す。同図(a)において、出力点Pが直線 J_1J_2 上にあるとき、点Pは直線 J_1J_2 に直角の方向にしか運動できない。このような特異点はシリアルマニピュレータ機構に現れる特異点と類似の性質を有しており、力学的には特に問題はない。これに対して、(b-1)では3点 $J_2J_5J_4$ が同一直線上にあり、二つの入力間に従属関係が生じており、また直線 J_2J_4 に直角方向の外力成分 F を支持することができない。(b-2)は $\overline{J_2J_5} = \overline{J_4J_5}$ の機構において対偶点 J_2 と J_4 が一致した場合で、出力点Pは任意の回転運動を行い、対偶 J_1 と J_3 に入力を与えることはできない。これらの特異点は閉ループ機構に特有のものであって、この特異点(以下、単に特異点と呼ぶ)ではマニピュレータ全体のコンフィギュレーションが定まらず制御不能となったり、入力源に過大な負荷がかかり破壊をまねく恐れがあるため、パラレルマニピュレータの機構設計時および運用時には特異点の位置を確実に把握する必要がある。このパラレルマニピュレータ機構の特異点は、幾何学的条件によって定まるエンドエフェクタが到達可能な領域、すなわち作業領域の内部に連続的に存在してこの領域を複数の領域に分割する。入力節を駆動してエンドエフェクタをこれらの分割された複数の領域にまたがって移動させることは不可能であるから、エンドエフェクタはこの特異点によって囲まれた一つの閉領域のみを真の作業領域としてもつことになる。

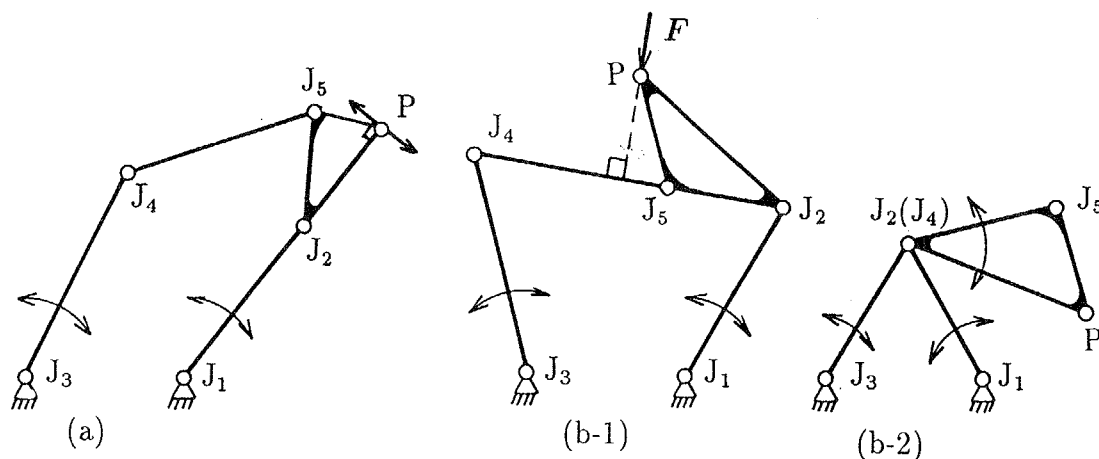


図3.1 2自由度平面5節機構の特異点の例

ところで、作業領域内の運動伝達性に優れた領域は、本来パラレルマニピュレータがその性能を発揮することが望まれる高精度・高速・高負荷作業に適した領域であり、この領域が十分に得られればよいが、十分な大きさの領域を得ることが困難である場合も多い。また、軽負荷で高い軌道精度が要求されない場合などにおいて使用される領域は、必ずしも運動伝達性に優れている必要はない。したがって、その内部に特異点およびその近傍を含まない領域を求めることはパラレルマニピュレータの機構設計において重要である。ここで、運動学および力学的観点から特異点と類似の性質を有する領域を特異点近傍と呼ぶことにする。

本章では、パラレルマニピュレータ機構における圧力角に着目した特異点解析法を提案するとともに、特異点近傍における運動学および静力学的特性について検討を加える。

3・2 パラレルマニピュレータ機構の特異点解析

3・2・1 パラレルマニピュレータ機構の特異点

まず、図 3.2 に示すように静止節と出力節の間に並列に配置された N 個の連結連鎖から出力節へ力のみが作用する機構を考える。連結連鎖 i での圧力角 $\alpha_i = 90^\circ$ 、すなわち、連結連鎖 i 内の入力変位 θ_i 以外の θ の成分をすべて一定値に固定したときに一つの入力の速度 $\dot{\theta}_i$ によって生じる出力節と連結連鎖 i の対偶点 P_i の速度 $v_{i,i}$ と点 P_i において連結連鎖 i から作用する力 f_i が直交するとき、機構は P_i に作用する $v_{i,i}$ 方向の外力成分に抗することができない。したがって、このときの機構の位置は特異点となる。複数の連結連鎖の圧力角が 90° となる場合も同様に機構は特異点となり、圧力角が 90° の連結連鎖内の入力節は駆動できず、出力節へ動力が伝達できない。出力節を支持する各連結連鎖から出力節へモーメントが作用する 3 自由度球面パラレルマニピュレータ機構の場合も同様である。

よって、パラレルマニピュレータ機構の特異点を、第 2 章で提案した運動伝達指数 $TI = \min(\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \dots, \cos\alpha_N)$ が

$$TI = 0 \quad (3.1)$$

となる点であると定義する。つまり、特異点において機構は、圧力角が 90° となる連結連鎖内の入力節以外のすべての入力節を固定したときの出力節の瞬間らせん軸に沿った方向の成分をもつ出力節負荷が支持できない。

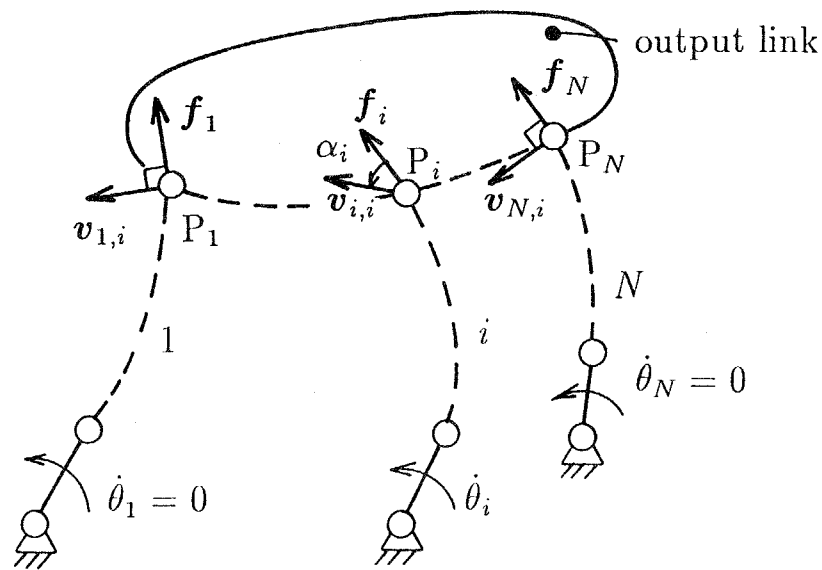


図 3.2 各連結連鎖と出力節の対偶点における速度と作用力

具体的に回転対偶のみからなる 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の特異点の一例を図 3.3 に示す. 図 3.3 は, $J_{1,i}J_{2,i}$ ($i = 1, 2, 3$) を入力節, $J_{3,1}J_{3,2}J_{3,3}$ を出力節, 点 P を出力点とし, 静止対偶 $J_{1,1}J_{1,2}J_{1,3}$ が原点 O を中心とする半径 1 の円周上に, また出力節上の対偶 $J_{3,1}J_{3,2}J_{3,3}$ が出力点 P を中心とする半径 0.5 の円周上にそれぞれ等間隔に配置され, $\overline{J_{1,i}J_{2,i}} = \overline{J_{2,i}J_{3,i}} = 1$ の機構定数を有する機構において, $\overline{J_{3,1}J_{3,2}}$ が X 軸と平行となるように姿勢角を保持した状態での特異点を例示している. なお, 同一の機構においては出力節の姿勢を変えれば特異点の位置は変化する. この平面パラレルマニピュレータ機構において対偶点 $J_{3,i}(P_i)$ において連結連鎖 i から出力節へ作用する力 f_i の方向は $\overline{J_{2,i}J_{3,i}}$ であり, $\dot{\theta}_i$ によって生じる点 P_i の速度 $v_{i,i}$ は 2 直線 $J_{2,j}J_{3,j}$ と $J_{2,k}J_{3,k}$ ($j, k \neq i$) の交点と P_i を結ぶ直線に直交する方向である. したがって, この機構の特異点は図 3.3 に示すように 3 直線 $J_{2,1}J_{3,1}$, $J_{2,2}J_{3,2}$, $J_{2,3}J_{3,3}$ が 1 点 C で交わる時であり, このときすべての圧力角が 90° となり $TI = 0$ となる. また, すべての入力に対する瞬間中心は C に一致するから, 出力節の運動の自由度は 1 に減少し, 点 C 回りの外力モーメントは支持できない.

さて, このような特異点の集合は一般に複数の曲線となり, これらを特異点曲線と呼ぶことにする. いわゆる作業領域, すなわち姿勢角を一定とした場合に幾何学的条件のみによって定まる点 P の到達可能領域である三つの円弧 A_1A_2 , A_2A_3 および A_3A_1 で囲まれた領域は図 3.3 の例では特異点曲線により三つの領域に分割され, 点 P はこれら三つ

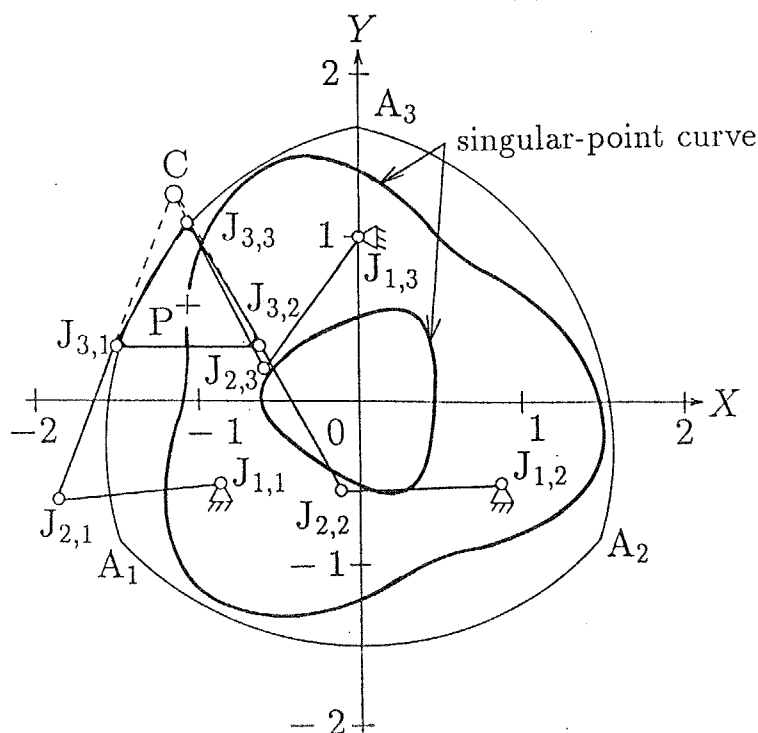


図 3.3 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の特異点の例

の領域間を自由に移動することはできない。また、スチュワートプラットフォームに代表される 6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構の特異点の集合は曲面となるので、これを特異点曲面と呼ぶことにする。

3・2・2 特異点の算出に関する考察

一般のパラレルマニピュレータ機構に対して、 $TI = 0$ となる全ての位置を数式により陽に表すことは困難であるから、特異点の位置は 1 点ごとに $TI = 0$ となる点として数値的に求めることになる。

まず、 TI を用いて特異点を求める際の問題点について考察する。 $TI = 0$ の点を探索する場合、実際には $TI \simeq 0$ である点を求めることになるが、幾ら以下の数値を零と見なすか、またその点のごく近傍に真の特異点があるのかどうかを見極めねばならない。前者については、計算精度との兼ねいで統一的な数値を定めることはかなり難しい。ただし、 TI は変域が $[0, 1]$ の無次元量であるから有次元量であるヤコビ行列式等の評価量に比べれば扱い易い。後者については、特異点を通過するときに TI あるいは $\cos \alpha_i$ の符号が変化する等の性質があればよいが、 TI や $\cos \alpha_i$ にはそのような性質はない。そこで、特

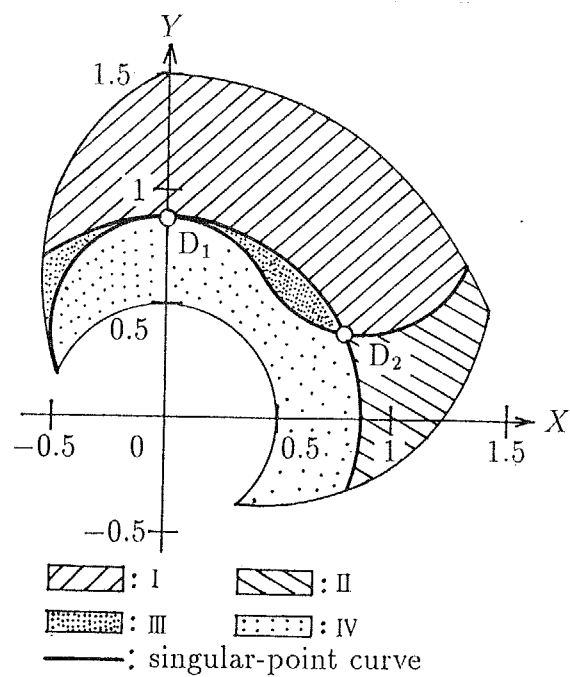
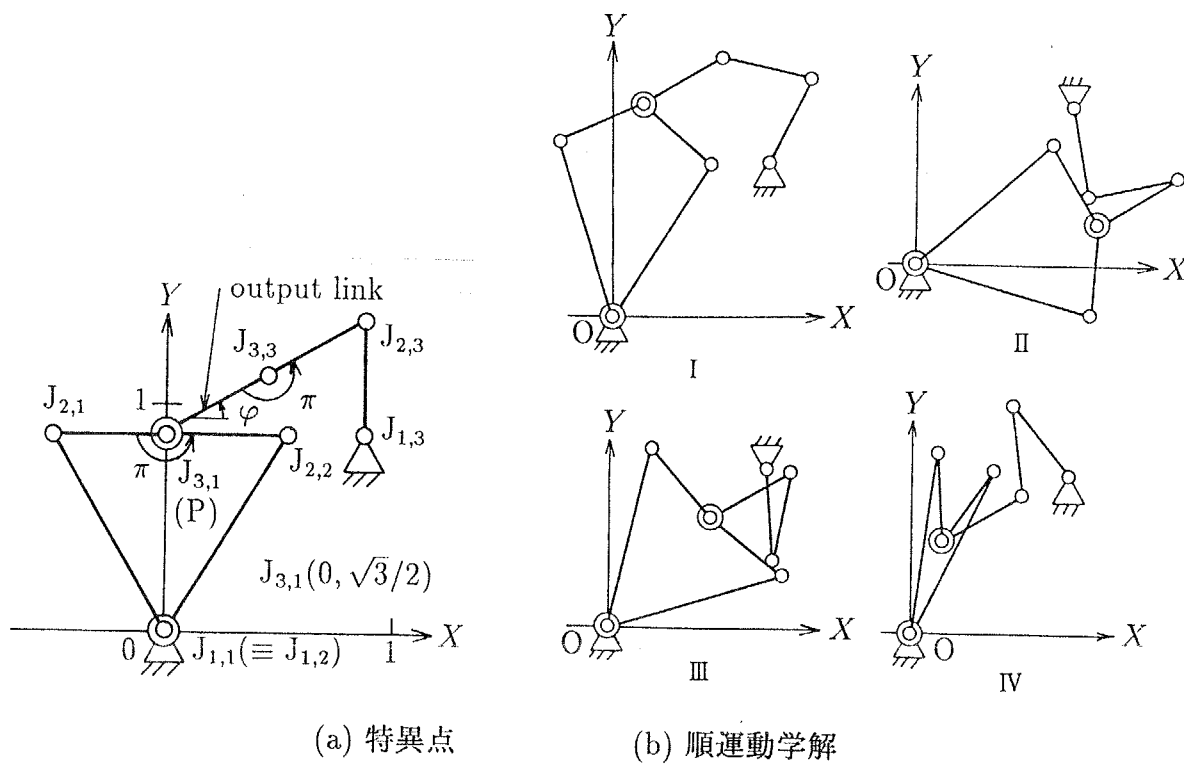
表 3.1 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構の機構定数

$J_{1,1}(X_{1,1}, Y_{1,1})$	$(0,0)$	$\overline{J_{2,2}J_{3,1}}$	0.5
$J_{1,3}(X_{1,3}, Y_{1,3})$	$(\sqrt{3}/2, \sqrt{3}/2)$	$\overline{J_{1,3}J_{2,3}}$	0.5
$\overline{J_{1,1}J_{2,1}}$	1	$\overline{J_{2,3}J_{3,3}}$	0.5
$\overline{J_{2,1}J_{3,1}}$	0.5	$\overline{J_{3,1}J_{3,3}}$	0.5
$\overline{J_{1,1}J_{2,2}}$	1		

異点の前後でその符号が変化する量について検討を加えたところ、特異点の前後で入力速度を出力速度へ変換するヤコビ行列の行列式 $\det[J]$ の符号 $\text{sgn}(\det[J])$ が多くの場合において変化することがわかった。したがって、 $TI \simeq 0$ であり、かつその前後でヤコビ行列式の符号が変化すれば、その点は特異点であると確認することができる。

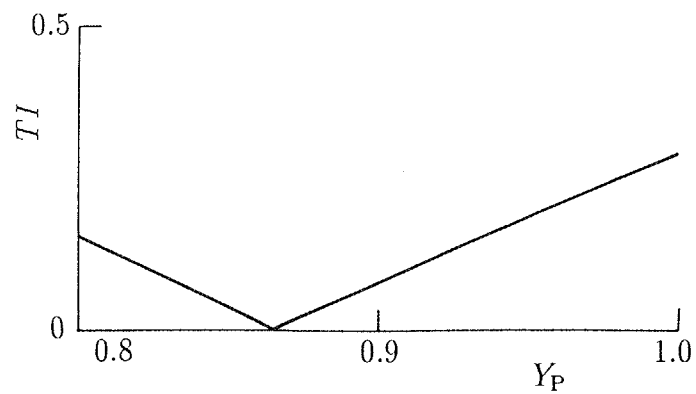
しかし、特異点であってもその前後でヤコビ行列式の符号は必ずしも変化しない。例えば、表 3.1 の機構定数を有し、 $J_{3,1}$ を出力点 P とする 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構において、図 3.4(a) は明らかに特異点であり、この点は同図 (b) に示すこの機構の 4 種類の順運動学解のうち I、III および IV が一致した同図 (c) の点 D_1 であって、I と IV の順運動学解に対する作業領域間で計算機上で点 D_1 を通過させても、すなわち出力点 P を Y 軸にそって移動して点 D_1 を通過させても、ヤコビ行列式の符号は変化しない。なお、この機構の順運動学解 I ~ IV の区別は二つの角 $\angle J_{2,1}J_{3,1}J_{2,2}$ と $\angle J_{3,1}J_{3,3}J_{2,3}$ が $0 \sim \pi$, $\pi \sim 2\pi$ のいずれの範囲にあるかの組み合わせによる。計算結果の一例として、出力点 P を Y 軸にそって移動させた場合の TI および $1/\det[J]$ の変化を図 3.5 に示す。また、比較の一例として点 P を X 軸にそって移動させた場合の結果を図 3.6 に示す。図 3.5 より、出力点 P が Y 軸にそって移動し、点 D_1 を通過するとき $TI = 0$ となるが、点 D_1 の前後でヤコビ行列式の符号は変化しないことがわかる。一方、X 軸上を点 P を移動させた場合には、図 3.6 より $TI = 0$ であってその前後でヤコビ行列式の符号が変化する特異点が存在することが確認できる。この点は図 3.4(c) の X 軸上の解 II と IV の境界点である。したがって、上述の TI の数値とヤコビ行列式の符号を組み合わせで特異点を求める方法では、点 D_1 は特異点とは判断されないことになる。また、図中の点 D_2 についても点 D_1 の場合と同様に、I と IV の順運動学解に対する作業領域間で計算機上で点 D_2 を通過させてもヤコビ行列式の符号は変化しない。

次に、機構設計時において特異点曲線すなわち連続的に存在する特異点によって囲まれる作業領域を求める際の問題点について考察する。図 3.4(a) に示したように特異点であると確認できない場合があると、図 3.4 の場合では I と IV の和領域が一つの作業領域

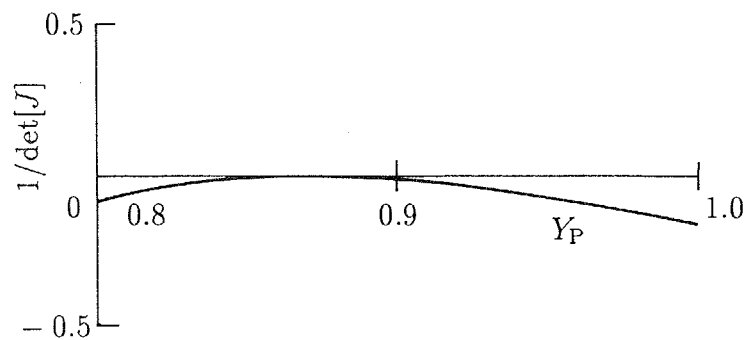


(c) 作業領域 ($\varphi = 30^\circ$)

図 3.4 ヤコビ行列式の符号が変化しない特異点の例

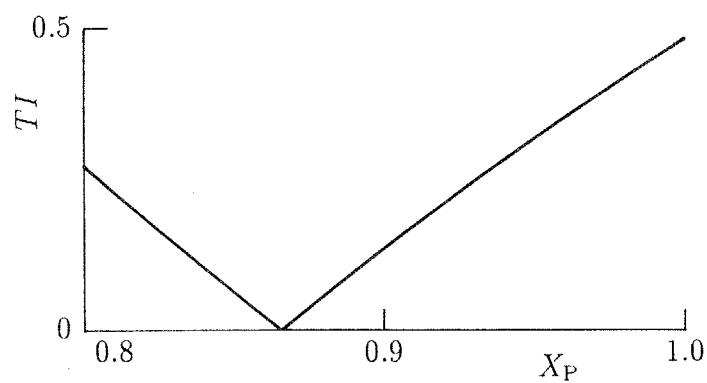


(a) TI の変化

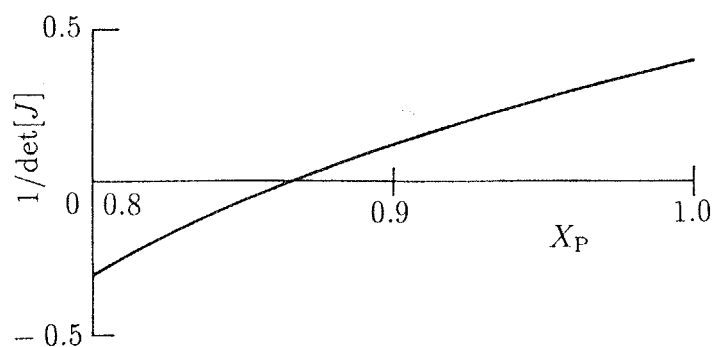


(b) $1/\det[J]$ の変化

図 3.5 出力点 P が Y 軸上を移動するときの TI , $1/\det[J]$ の変化



(a) TI の変化



(b) $1/\det[J]$ の変化

図 3.6 出力点 P が X 軸上を移動するときの TI , $1/\det[J]$ の変化

表 3.2 スチュワートプラットフォームの機構定数

$\beta_{1,1}$	90°	$\beta_{2,1}$	30°
$\beta_{1,2}$	90°	$\beta_{2,2}$	150°
$\beta_{1,3}$	210°	$\beta_{2,3}$	150°
$\beta_{1,4}$	210°	$\beta_{2,4}$	270°
$\beta_{1,5}$	330°	$\beta_{2,5}$	270°
$\beta_{1,6}$	330°	$\beta_{2,6}$	30°
R	2	r	1

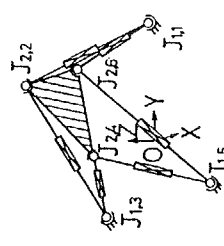
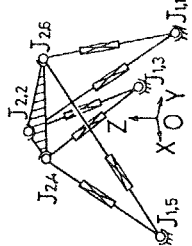
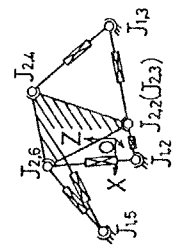
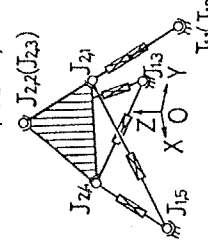
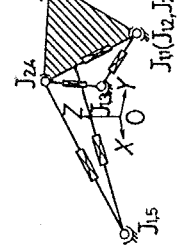
としてとらえられる可能性があり、機構設計時にはこのような誤判定を回避しなければならない。そこで、新たに $TI < TI_{limit}$ なる領域を特異点近傍として定義して、特異点とほぼ同じ性質を有して実用的でない特異点近傍を作業領域から排除し、実際に用いることができる作業領域を機構設計時に確実に求められるようにすることを提案する。ここで、 TI_{limit} の数値は機構の運動学および力学的特性に基づき定義されるべきものであるので、その数値の選定については 3・4 節において具体的に検討を加える。

3・3 スチュワートプラットフォームの特異点解析

表 3.2 の機構定数を有するスチュワートプラットフォームについて、その出力節上の点 P の位置 (X_P, Y_P, Z_P) および出力節の姿勢 ($\varphi_R, \varphi_P, \varphi_Y$) を種々に変え、 TI およびヤコビ行列式の符号を用いて特異点を探索した。

具体的に、出力節の位置 (X_P, Y_P, Z_P) の 3 成分および姿勢 ($\varphi_R, \varphi_P, \varphi_Y$) のうちの 2 成分を与え、残りの一つの姿勢角を 10^{-10}rad の精度で変化させ、その前後でヤコビ行列式の符号が変化して $TI < 10^{-3}$ となる点を特異点と判定することにする。数多くの位置・姿勢において特異点となることが確認されるが、それらの幾つかについては機構の幾何学的条件により分類することができる。その結果を表 3.3 に示す。同表には、その条件を満たす位置・姿勢 $P(X_P, Y_P, Z_P, \varphi_R, \varphi_P, \varphi_Y)$ の一例とその点における各圧力角の余弦の値を示してある。同表より、特異点となる位置・姿勢によって圧力角が 90° となる入力的位置・数に違いがあることがわかる。表中の条件は同表中の例に対応したもので、機構の対称性から A, C ~ E 形については同様の条件がそれぞれ二通り存在する。なお、表 3.3 において、A 形は K.H.Hunt⁽¹¹⁾ により、C 形は津坂ら⁽¹⁸⁾ により、D 形は杉本⁽¹⁴⁾ によりそれぞれ存在が指摘されている。

表 3.3 スチュワートプラットフォームの特異点

Type	A	B	C	D	E
Conditions	$\triangle J_{2.4}J_{1.3}J_{1.5}$ $\triangle J_{2.4}J_{1.5}J_{2.6}$ $\triangle J_{2.4}J_{2.6}J_{2.2}$ $\triangle J_{2.4}J_{2.2}J_{1.3}$ are coplanar.	$\varphi_R = \varphi_P = 0$ $\varphi_Y = 90^\circ$	$J_{1.2}J_{2.2}$ and $J_{1.3}J_{2.3}$ are colinear.	$J_{1.2}J_{2.2}$ and $J_{1.1}J_{2.1}$ are colinear.	$J_{1.2}J_{2.2} = 0$ $J_{1.1}J_{1.5}$ and $J_{2.4}J_{2.6}$ are parallel. $\hat{z}_P \perp \hat{z}$
Example	$P(-1.2, 0.8, 1,$ $29.0546^\circ, 0, 0)$ 	$P(0, 0, 2, 0, 0, 90^\circ)$ 	$P(-0.4, 1.2, 1,$ $-85.1141^\circ,$ $-54^\circ, -54^\circ)$ 	$P(-0.4, -0.8, 1.4,$ $-21.2451^\circ,$ $36^\circ, 72^\circ)$ 	$P(0, 2, 1, 90^\circ,$ $-60^\circ, 120^\circ)$ 
	$\cos \alpha_1 = 0.97$ $\cos \alpha_2 = 0.58$ $\cos \alpha_3 = 0.68$ $\cos \alpha_4 = 7.7 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_5 = 9.1 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_6 = 0.34$	$\cos \alpha_1 = 6.9 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_2 = 4.6 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_3 = 6.9 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_4 = 4.6 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_5 = 6.9 \times 10^{-10}$ $\cos \alpha_6 = 4.6 \times 10^{-10}$	$\cos \alpha_1 = 1.9 \times 10^{-2}$ $\cos \alpha_2 = 2.2 \times 10^{-7}$ $\cos \alpha_3 = 2.2 \times 10^{-7}$ $\cos \alpha_4 = 2.3 \times 10^{-3}$ $\cos \alpha_5 = 1.8 \times 10^{-2}$ $\cos \alpha_6 = 2.4 \times 10^{-2}$	$\cos \alpha_1 = 9.6 \times 10^{-8}$ $\cos \alpha_2 = 8.6 \times 10^{-6}$ $\cos \alpha_3 = 0.10$ $\cos \alpha_4 = 9.9 \times 10^{-3}$ $\cos \alpha_5 = 9.9 \times 10^{-4}$ $\cos \alpha_6 = 3.6 \times 10^{-5}$	$\cos \alpha_1 = 0.64$ $\cos \alpha_2 = 0.77$ $\cos \alpha_3 = 0.77$ $\cos \alpha_4 = 0.87$ $\cos \alpha_5 = 0.89$ $\cos \alpha_6 = 8.1 \times 10^{-11}$

次に、特異点において支持できない負荷について具体的に調べた。その結果の一例を B 形について示すことにする。B 形の特異点では、各連結連鎖の圧力角はすべて 90° で、全入力に対応する出力節の瞬間らせん軸は一致して、この瞬間らせん軸とそのピッチは出力節の位置によって異なる。例えば、 $X_P = Y_P = 0, Z_P = 1$ のときには、 Z 軸と一致するピッチ -1 のらせん軸に、また $X_P = 1, Y_P = 0, Z_P = 2$ のときには、 $(0, 0.2, 0)$ を通る $(0.4472, 0, 0.8944)$ に平行なピッチ -0.4 のらせん軸に沿った力・モーメントがそれぞれ支持できない。E.F.Fichter⁽²⁶⁾は、この特異点にさらに $X_P = Y_P = 0$ の条件を加えた特異点について検討を加え、その特異点において出力節は Z 軸回りのらせん運動に対応した自由度をもつ、つまり Z 軸を軸とするらせんに沿った力・モーメントが支持できないと指摘している。表 3.3 に示す B 形の特異点は E.F.Fichter の指摘した特異点を包含している。

さらに、表 3.3 の A ~ E の条件を満たす特異点の探索を具体的に行った。ここでは A 形について示すことにする。平面 $J_{2,4}J_{1,3}J_{1,5}$ と $J_{2,2}$ および $J_{2,6}$ の距離 $d_{4,2}, d_{4,6}$ がともに一定値 ε_d 以下の特異点を A 形であると判定する。他の 2 組の平面と 2 点の組合せについても同様の距離 $d_{2,4}, d_{2,6}$ および $d_{6,2}, d_{6,4}$ によって判定することにする。 $\varepsilon_d = 0.02$ としたところ、表 3.3 に示す点以外にも多くの特異点が A 形と判定された。まず、表 3.3 に示す点について、 $(X_P, Y_P, Z_P, \varphi_P, \varphi_Y)$ を表 3.3 中の数値に固定し、 φ_R のみを変化させたときの $\text{sgn}(\det[J]) \cdot TI, d_{4,2}, d_{4,6}$ の変化を図 3.7 に示す。ここで $d_{4,2}, d_{4,6}$ については平面と点の位置関係を明確にするために、絶対値ではなく符号をつけて示している。例えば、平面 $J_{2,4}J_{1,3}J_{1,5}$ と点 $J_{2,2}(X_{2,2}, Y_{2,2}, Z_{2,2})$ の距離 $d_{4,2}$ は、平面 $J_{2,4}J_{1,3}J_{1,5}$ の方程式を

$$aX + bY + Z + c = 0$$

と表すとき、 $d_{4,2}$ を

$$d_{4,2} = (aX_{2,2} + bY_{2,2} + Z_{2,2} + c) / \sqrt{a^2 + b^2 + 1} \quad (3.2)$$

により計算する。図 3.7 より、 $\varphi_R = 29.0546^\circ$ において $TI = 0, d_{4,2} = d_{4,6} = 0$ となり、その前後でヤコビ行列式の符号が変化するから、 $\varphi_R = 29.0546^\circ$ において A 形の特異点となることが確認できる。つぎに、 $\varepsilon_d = 0.02$ の条件から A 形特異点であると判定された $Z_P = -1.2, Y_P = -1.6, Z_P = 4.2, \varphi_R = 36^\circ, \varphi_P = 46.1786^\circ, \varphi_Y = 0$ についても同様に φ_P のみを変化させたときの $\text{sgn}(\det[J]) \cdot TI, d_{6,2}, d_{6,4}$ の変化を図 3.8 に示す。同図より $\varphi_P = 46.1786^\circ$ において特異点となるが、 $d_{6,2} \neq 0, d_{6,4} \neq 0$ となり A 形特異点の条件を満

足していないことがわかる。この特異点は、A 形以外の従来から指摘されている具体的な特異点の中には含まれていない。また、この特異点における瞬間らせん軸を調べてみると、 $J_{2,2}J_{2,4}$ と一致するピッチ零のものはない。すなわち、この点では $J_{2,2}J_{2,4}$ まわりの外力モーメントのみが支持できない⁽¹¹⁾ という A 形特異点の特徴を有していない。

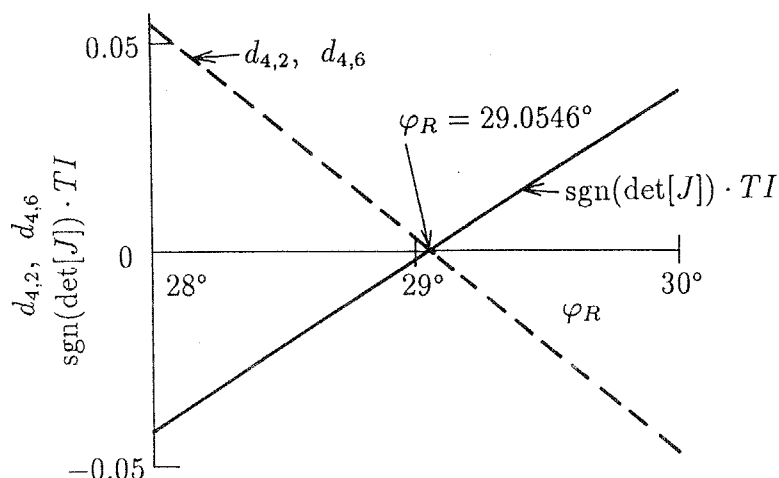


図 3.7 $\text{sgn}(\det[J]) \cdot TI$ と $d_{4,2}, d_{4,6}$ の変化
($X_P = -1.2, Y_P = 0.8, Z_P = 1, \varphi_P = \varphi_Y = 0$)

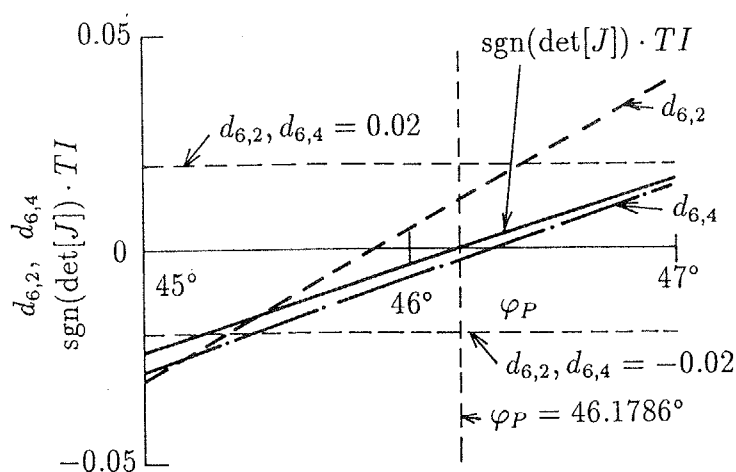


図 3.8 $\text{sgn}(\det[J]) \cdot TI$ と $d_{6,2}, d_{6,4}$ の変化
($X_P = -1.2, Y_P = -1.6, Z_P = 4.2, \varphi_R = 36^\circ, \varphi_Y = 0$)

3・4 特異点近傍の評価

本節では出力変位誤差，発生力の等方性および外力に対する駆動力と TI との関係を具体的にスチュワートプラットフォームをとりあげて調べ，特異点近傍の評価について検討を加える．

3・4・1 出力変位誤差

スチュワートプラットフォームにおける出力変位誤差の要因として，球対偶の取付け誤差とすきまに起因する球対偶の位置誤差および入力変位誤差を考える．

出力変位誤差 $\Delta \mathbf{P}$ を位置誤差 $\Delta \mathbf{P}_P = [\Delta X_P, \Delta Y_P, \Delta Z_P]^T$ と出力節の各静止座標軸まわりの角変位誤差 $\Delta \mathbf{P}_O = [\Delta \theta_X, \Delta \theta_Y, \Delta \theta_Z]^T$ に分けて考える．球対偶 $J_{j,i} (j = 1, 2; i = 1, 2, \dots, 6)$ の位置誤差を $\Delta \mathbf{X}_{S(j,i)} = [\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S]_{(j,i)}^T$ ，入力変位誤差を $\Delta \theta = [\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \dots, \Delta \theta_6]^T$ で表し，これらは微小であり，次式が成り立つとする．

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_P \\ \Delta \mathbf{P}_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{PI} \\ J_{OI} \end{bmatrix} \Delta \theta + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \begin{bmatrix} J_{PS} \\ J_{OS} \end{bmatrix}_{(j,i)} \Delta \mathbf{X}_{S(j,i)} \quad (3.3)$$

上式において $[J_{PI}], [J_{OI}]$ は (3×6) 行列でヤコビ行列 $[J]$ の部分行列であり， $[J_{PS}]_{(j,i)}, [J_{OS}]_{(j,i)}$ は (3×3) 行列である．

各球対偶の位置誤差が次式

$$\Delta X_S^2 + \Delta Y_S^2 + \Delta Z_S^2 \leq e_S^2 \quad (3.4)$$

を満足する場合を考え，各球対偶の位置誤差が出力変位誤差に及ぼす影響を $[J_{PS}]_{(j,i)}$ および $[J_{OS}]_{(j,i)}$ の最大特異値 $\sigma_{P(j,i)}, \sigma_{O(j,i)}$ によって評価する．これらは式 (3.4) で定義される各球対偶の位置誤差によって生じ得る出力変位誤差の最大値の各球対偶の位置誤差の最大値 e_S に対する比を表す．また，入力変位誤差 $\Delta \theta_i$ の影響については， $\Delta \theta_i$ が

$$|\Delta \theta_i| \leq e_I \quad (3.5)$$

を満足する場合を考え，

$$e_{P(i)} = \sqrt{\sum_{k=1}^3 a_{PI(k,i)}^2} \quad (3.6)$$

$$e_{O(i)} = \sqrt{\sum_{k=1}^3 a_{OI(k,i)}^2} \quad (3.7)$$

によって評価する．ここで， $a_{PI(k,i)}$ および $a_{OI(k,i)}$ はそれぞれ $[J_{PI}], [J_{OI}]$ の第 (k, i) 成分を表す．式 (3.6), (3.7) の評価量は式 (3.5) で定義された各入力変位誤差によって生じ得る出力変位誤差の最大値の各入力変位誤差の最大値 e_I に対する比を表す．

まず, $\sigma_{P(j,i)}$ と $e_{P(i)}$, $\sigma_{O(j,i)}$ と $e_{O(i)}$ の関係を具体的に調べたところ, それらは常に一致し, 二つの球対偶 $J_{1,i}$ と $J_{2,i}$ を結ぶ方向の球対偶の位置誤差が出力変位誤差に最も影響を及ぼすことがわかった. そこで, スチュワートプラットフォームの機構定数 $R, r, \beta_{1,i}, \beta_{2,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) のうち $r = 1, \beta_{1,1} = 90^\circ, \beta_{1,3} = 210^\circ, \beta_{1,5} = 330^\circ, \beta_{2,2} = 150^\circ, \beta_{2,4} = 270^\circ, \beta_{2,6} = 30^\circ$ とし, 残りを $\beta_{1,2} = \beta_{1,1} + \Delta\beta_1, \beta_{1,4} = \beta_{1,3} + \Delta\beta_1, \beta_{1,6} = \beta_{1,5} + \Delta\beta_1, \beta_{2,3} = \beta_{2,2} + \Delta\beta_2, \beta_{2,5} = \beta_{2,4} + \Delta\beta_2, \beta_{2,1} = \beta_{2,6} + \Delta\beta_2$ として, R を $1 \sim 5, \Delta\beta_1$ および $\Delta\beta_2$ を $0 \sim 120^\circ$ の範囲内で, 出力節の位置・姿勢については, X_P, Y_P を $-5 \sim 5, Z_P$ を $0 \sim 10, \varphi_R, \varphi_P, \varphi_Y$ を $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内でそれぞれ一様乱数により与え, 合計 10 000 組の機構定数・位置・姿勢に対して TI と $e_{P(i)}$ の最大値 $e_{P,\max}$ および $e_{O(i)}$ の最大値 $e_{O,\max}$ の関係を求めた. その結果を図 3.9 に示す. 同図より TI が小さくなるにつれて出力変位誤差は指数関数的に大きくなり, 例えば同図 (a) より, 特異点に近い $TI < 0.1$ の領域では入力変位誤差や球対偶の位置誤差が $2 \sim 10^4$ 倍に拡大され, 運動伝達性の良好な領域, 例えば $TI \geq 0.5$ の領域に比べて位置決め誤差が著しく低下することがわかる.

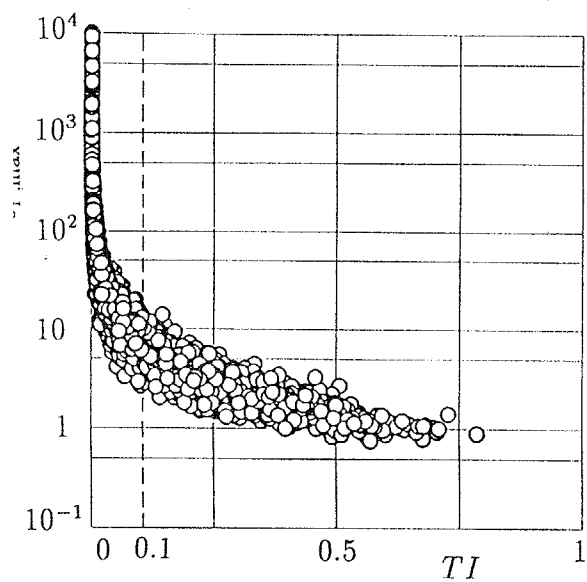
3・4・2 発生力の等方性

駆動力 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_6]$ と, これにより出力節の点 P に発生する力・モーメント $[-\mathbf{F}, -\mathbf{M}] = -[F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z]$ の間には次式が成り立つ.

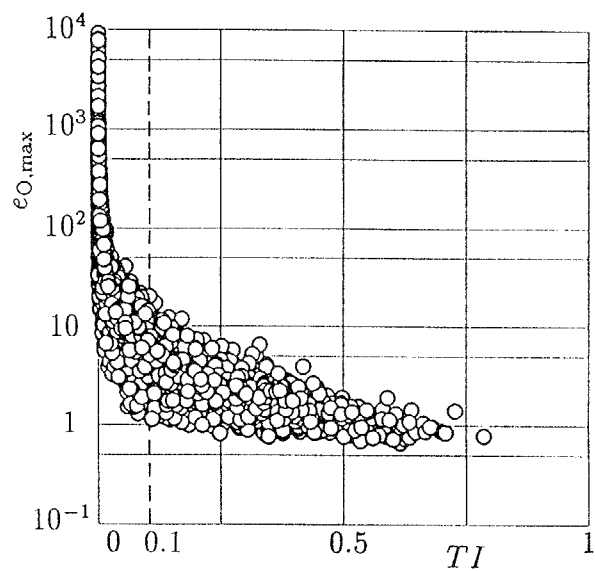
$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F} \\ -\mathbf{M} \end{bmatrix} = \{[J]^T\}^{-1} \mathbf{f} = \begin{bmatrix} J_F \\ J_M \end{bmatrix} \mathbf{f} \quad (3.8)$$

ここで $[J_F]$ と $[J_M]$ は (3×6) 行列である. 上式において, 発生力の並進成分と回転成分の等方性を個別に評価するために $[J_F]$ と $[J_M]$ を特異値分解してそれぞれの条件数⁽⁴⁵⁾ (最大特異値の最小特異値に対する比) C_F, C_M を発生力の等方性の評価量とする. これらの数値は 1 に近いほどその点において全方向に均等に力・モーメントが発生できることを表す.

具体的に前項と同様に機構定数および出力節の位置・姿勢を一様乱数により 10000 組与え, TI と $1/C_F, 1/C_M$ の関係を求め図 3.10 に示す. 同図より, $1/C_F, 1/C_M$ は TI に対して幅広く分布しているが, これらの最小値は TI によりほぼ決定され, TI が小さいほどそれらは小さくなることがわかる. つまり, TI の小さな領域では発生力の等方性は著しく低下する可能性があることがわかる.

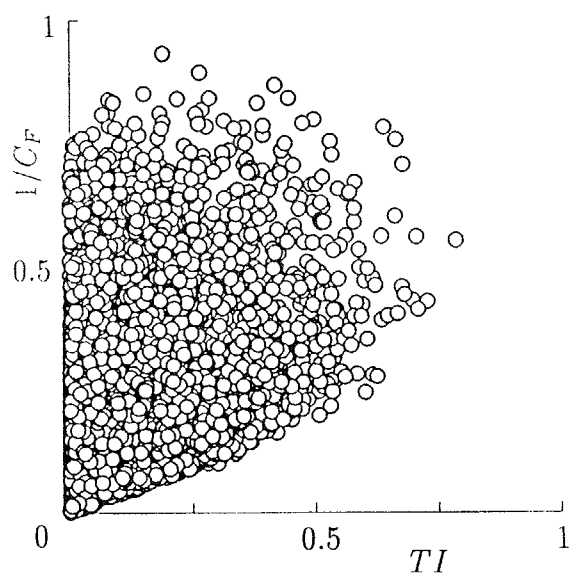


(a) TI と $e_{P,\max}$ の関係

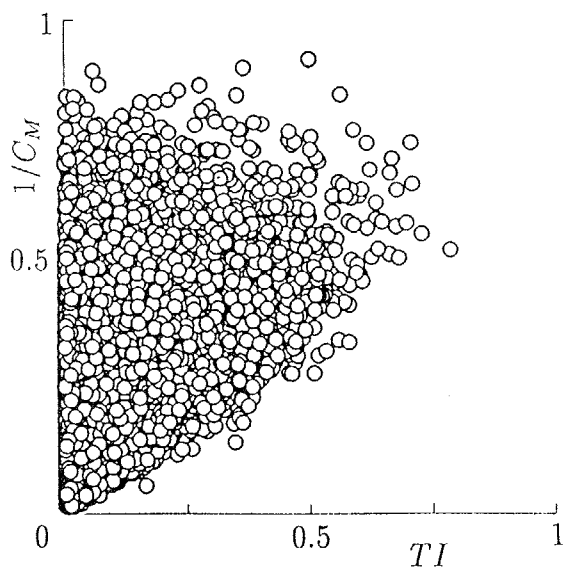


(b) TI と $e_{O,\max}$ の関係

図 3.9 TI と出力変位誤差の関係



(a) TI と $1/C_F$ の関係



(b) TI と $1/C_M$ の関係

図 3.10 TI と発生力の等方性関係

3・4・3 外力に対する駆動力

出力節の点 P に次の (1) ~ (6) に示す 6 通りの外力 $[F, M]$ を加えたときの駆動力 f を求め、外力条件 (1) ~ (3) の下での 18 個の $|f_i|$ の値の中の最大値を $f_{F, \max}$ 、条件 (4) ~ (6) の下での最大値を $f_{M, \max}$ として、 TI と $f_{F, \max}$, $f_{M, \max}$ および $1/C_F$ と $f_{F, \max}$, $1/C_M$ と $f_{M, \max}$ の関係を調べた。

$$(1) [F, M] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$(2) [F, M] = [0, 1, 0, 0, 0, 0]$$

$$(3) [F, M] = [0, 0, 1, 0, 0, 0]$$

$$(4) [F, M] = [0, 0, 0, 1, 0, 0]$$

$$(5) [F, M] = [0, 0, 0, 0, 1, 0]$$

$$(6) [F, M] = [0, 0, 0, 0, 0, 1]$$

図 3.10 の場合と同一の 10000 組の機構定数・出力節の位置・姿勢に対して解析を行った。まず、 TI と $f_{F, \max}$ および $f_{M, \max}$ の関係を調べたところ、これらはそれぞれ図 3.9 に示した TI と $e_{P, \max}$ および $e_{O, \max}$ の関係とほぼ同じであった。ついで、 $1/C_F$ と $f_{F, \max}$ の関係を $TI \geq 0.1$ の場合と $TI < 0.1$ の場合に分けて図 3.11 に示す。同図より、 $TI \geq 0.1$ の場合では発生力の等方性にほぼ無関係に駆動力は外力の 10 倍以下となるが、 $TI < 0.1$ では発生力の等方性が良好でも著しく大きな駆動力を必要とする点が数多く存在することがわかる。なお、 $1/C_M$ と $f_{M, \max}$ の関係もほぼ図 3.11 と同じであった。

3・4・4 特異点近傍と実用作業領域

3・4・1 項から 3・4・3 項で述べた出力変位誤差、発生力の等方性、外力に対する駆動力の観点から、 TI_{limit} の数値について種々検討を加えた結果、 $TI < 0.1$ を特異点近傍と定めることにした。そして、いわゆる作業領域から特異点近傍を除いた領域を実用作業領域と呼ぶことにする。そして、表 3.2 に示す機構定数を有するスチュワートプラットフォームについて、各連結連鎖の長さについて $0 \leq \overline{J_{1,i}J_{2,i}} \leq 10$ の条件を加え、 $Y_P = 0, \varphi_R = \varphi_P = 30^\circ, \varphi_Y = 60^\circ$ に対する出力点 P の作業領域を $Z_P \geq 0$ について特異点近傍と実用作業領域に分けて示すと図 3.12 のようになる。

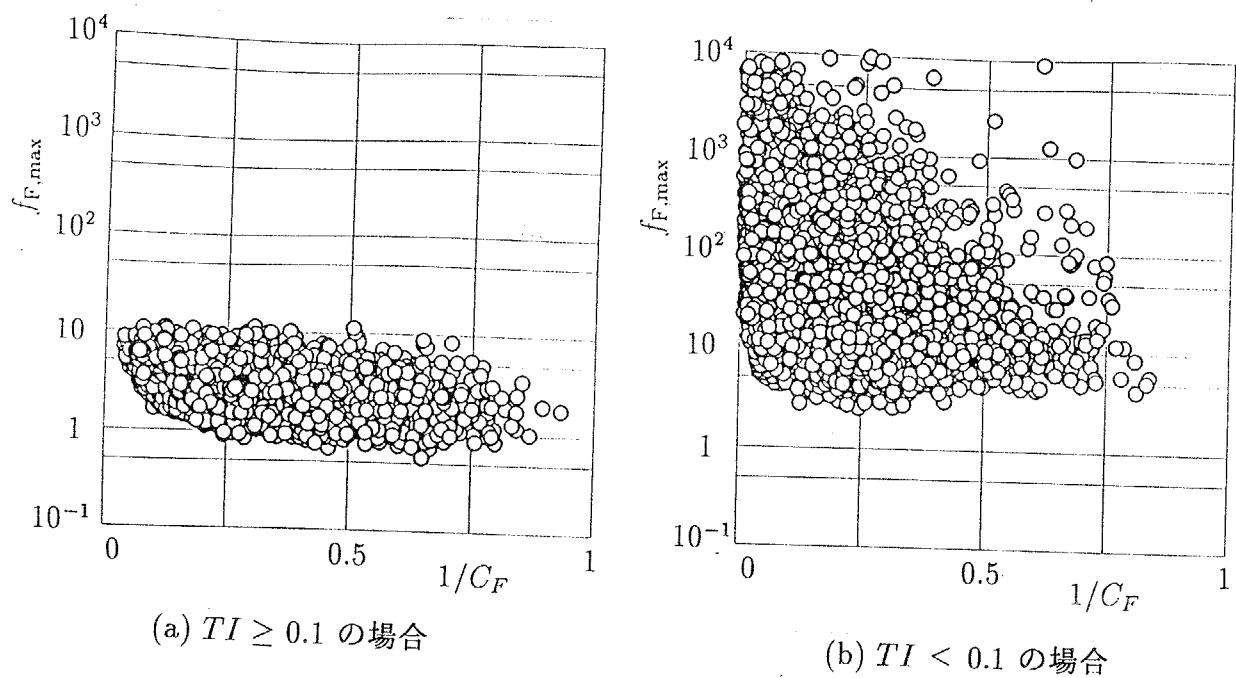


図 3.11 発生力の等方性と最大駆動力の関係

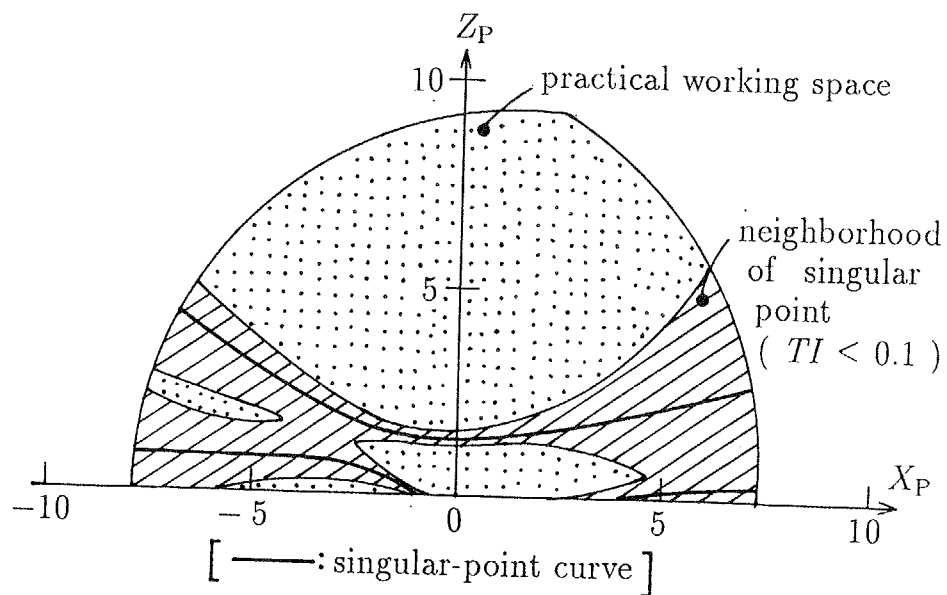


図 3.12 スチュワートプラットフォームの特異点近傍および実用作業領域
($Y_P = 0, \varphi_R = \varphi_P = 30^\circ, \varphi_Y = 60^\circ$)

3・5 結言

本章では、パラレルマニピュレータ機構の特異点の具体的な位置の算出法およびその近傍における運動学的・力学的特性について理論的考察を加えた。得られた結果を要約すれば次の通りである。

- (1) パラレルマニピュレータ機構の特異点においては各連結連鎖の圧力角のうち少なくとも一つが 90° つまり運動伝達指数 $TI = 0$ となる。
- (2) 運動伝達指数 $TI \simeq 0$ かつヤコビ行列式の符号が $TI \simeq 0$ となる前後において変わる点の特異点であり、この判定により特異点の算出がおおよそ可能である。この算出法によって見落とされる特異点を回転対偶のみからなる3自由度平面パラレルマニピュレータ機構について例示した。
- (3) 回転対偶のみからなる3自由度平面パラレルマニピュレータ機構について、上述の算出法により特異点を求めたところ、それらの集合は二つの曲線となり、これらを特異点曲線と呼ぶことにした。またパラレルマニピュレータ機構の作業領域は特異点曲線により複数の領域に分割され、機構出力点はこれらの分割された領域間を自由に移動できない。
- (4) 特異点において支持不可能となる出力節の負荷は、出力節の瞬間らせん軸を求めることにより把握できる。具体的にスチュワートプラットフォームの特異点解析を行い、従来知られていなかった特異点を見出すとともに、既知のものも含めて圧力角および瞬間らせん軸によって特異点における力学特性・運動特性を把握することができた。
- (5) 出力変位誤差、発生力の等方性および駆動力の観点から $TI < 0.1$ の領域を特異点近傍と定義し、具体的にその領域を示した。これにより、実用作業領域、すなわち実際に出力点を移動させてマニピュレーション可能な領域を求めることができた。

第4章 ロボット機構の出力の空間的等方性の評価

4・1 緒言

ロボットの基本的な運動特性は、その機構の形式・寸法およびアクチュエータの特性によってほぼ決定される。したがって、今日の厳しい要求性能を満足するロボットを開発・設計してゆくためには、従来形式のロボット機構の寸法改良にとどまらず、要求される性能に最も適合した機構の形式の選択、寸法の決定およびアクチュエータの選定を同時に、しかもより厳しく行わねばならない。このためには、パラレルマニピュレータ機構間ではもとよりシリアルマニピュレータ機構も含めた形式の異なる機構間での比較が可能で、しかもアクチュエータの特性を考慮し得るロボット機構の運動特性評価指標の確立が必要である。

ロボットが不特定の各種作業を行うことを考えれば、ロボット機構には各所に配置されたアクチュエータの発生速度(角速度)と発生力(トルク)を出力節における大きなしかも空間的等方性に優れた速度と力に変換・伝達することが要求される。本章では、エンドエフェクタにおいて全方向に均等な大きさの速度および力が発生でき、かつ全方向に均等に大きな動力が発生できるとき、このロボット機構の出力は空間的等方性に優れていると評価することにする。この出力の空間的等方性を評価するためには、発生並進速度および発生角速度、ならびに発生力および発生モーメントの互いに次元の異なる量を等価に扱うことを可能とした上で全方向に発生可能な出力動力を定量的に表すことが必要である。

まずロボットのエンドエフェクタにおける空間的等方性を考慮した発生力と発生速度に関する拘束条件式を設定し、発生力および発生モーメントならびに発生並進速度および発生角速度を等価に扱うことを可能とする。そして、ロボット機構の形式、寸法に依存しない出力の空間的等方性の評価量として、設定した発生力および発生速度に関する拘束条件下において全方向に発生可能な出力動力の最大入力動力に対する比で定義される動力伝達指数を提案する。

4・2 空間的等方性を考慮した力および速度の拘束条件式

本節では、出力節における発生力と発生モーメント、および並進速度と角速度それぞれについて空間的等方性を考慮した拘束条件式を設定する。

ロボットの出力節が全方向に発生できる力およびモーメントの大きさは、アクチュエー

タの発生トルクの限界や機構各部の剛性等により決定されるが、ここではこれらはアクチュエータの発生トルクの限界のみにより決定されるものとする。ロボットがあるポーズ(位置・姿勢)をとるとき、出力節において力のみを発生する場合に全方向に発生できる力の最大値を r_{τ_F} 、モーメントのみを発生する場合にはその全方向に発生可能な最大値を r_{τ_M} と表すことにし、これらを基準として、負荷の力 F 、モーメント M につりあう力 $-F$ 、モーメント $-M$ が出力節において同時に発生する場合の空間的等方性を考慮した F と M の拘束条件式を次式により設定する。

$$|F|^2/r_{\tau_F}^2 + |M|^2/r_{\tau_M}^2 \leq 1 \quad (4.1)$$

上式における r_{τ_F} および r_{τ_M} の導入により、出力節における発生力と発生モーメントをアクチュエータの発生トルクの限界に基づき数値的に等価に扱うことを可能としている。 r_{τ_F} および r_{τ_M} をそれぞれ最大全方向発生力および最大全方向発生モーメントと呼ぶ。

出力節の発生速度(並進速度を V 、角速度を Ω と表す)についてもアクチュエータの発生速度の限界により定まる最大全方向発生並進速度 r_{ω_V} および最大全方向発生角速度 r_{ω_Ω} を用いて次の拘束条件式を設定する。

$$|V|^2/r_{\omega_V}^2 + |\Omega|^2/r_{\omega_\Omega}^2 \leq 1 \quad (4.2)$$

なお、

$$\begin{aligned} F &= [F_X, F_Y, F_Z] \\ M &= [M_X, M_Y, M_Z] \\ V &= [V_X, V_Y, V_Z] \\ \Omega &= [\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z] \end{aligned}$$

であり、 F_X, F_Y, F_Z 等の各成分は静止座標系 $O-XYZ$ の X, Y および Z 軸方向の力、並進速度あるいは各軸まわりのモーメント、角速度を表す。

4・3 最大全方向発生力・モーメントおよび最大全方向発生並進速度・角速度の決定

本節では、アクチュエータの出力限界に基づき、 $r_{\tau_F}, r_{\tau_M}, r_{\omega_V}, r_{\omega_\Omega}$ の数値を決定する方法を示す。なおここでは、アクチュエータの発生力と発生速度の間には拘束関係がないものとし、それぞれの限界まで発生可能であるとする。

出力節の発生力・モーメントを $[-F, -M]^T$ 、並進速度・角速度を $[V, \Omega]^T$ で表す。そこでまず、ある大きさの力 F_0 およびモーメント M_0 を考え、

$$|F| = F_0, M = 0 \quad (4.3)$$

$$|M| = M_0, F = \mathbf{o} \quad (4.4)$$

なる条件下において全方向の F あるいは全方向の M に対してアクチュエータが発生すべき力(またはトルク)の各成分の絶対値を求め、それらの最大値を成分とするベクトルをそれぞれ τ_F, τ_M と表す。同様に、ある大きさの並進速度 V_0 および角速度 Ω_0 を考え、

$$|V| = V_0, \Omega = \mathbf{o} \quad (4.5)$$

$$|\Omega| = \Omega_0, V = \mathbf{o} \quad (4.6)$$

なる各条件下においてアクチュエータが発生すべき速度(または角速度) ω の各成分の絶対値の最大値を成分とするベクトルをそれぞれ ω_V, ω_Ω と表す。ここに、

$$\begin{aligned} \tau &= [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]^T \\ \tau_F &= [\tau_{F,1}, \tau_{F,2}, \dots, \tau_{F,N}]^T \\ \tau_M &= [\tau_{M,1}, \tau_{M,2}, \dots, \tau_{M,N}]^T \\ \omega &= [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T \\ \omega_V &= [\omega_{V,1}, \omega_{V,2}, \dots, \omega_{V,N}]^T \\ \omega_\Omega &= [\omega_{\Omega,1}, \omega_{\Omega,2}, \dots, \omega_{\Omega,N}]^T \end{aligned}$$

であり、 N はアクチュエータの数を表す。

ここで、アクチュエータの発生力の限界 τ_A および発生速度の限界 ω_A を

$$\begin{aligned} \tau_A &= [\tau_{A,1}, \tau_{A,2}, \dots, \tau_{A,N}]^T \\ \omega_A &= [\omega_{A,1}, \omega_{A,2}, \dots, \omega_{A,N}]^T \end{aligned}$$

と表し、 $|\tau_i| \leq \tau_{A,i}, |\omega_i| \leq \omega_{A,i} (i = 1, 2, \dots, N)$ とする。そこで、式(4.1)および(4.2)における $r_{\tau_F}, r_{\tau_M}, r_{\omega_V}, r_{\omega_\Omega}$ を仮に、

$$\left. \begin{aligned} r_{\tau_F} &= \min(\tau_{A,1}/\tau_{F,1}, \tau_{A,2}/\tau_{F,2}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{F,N}) F_0 \\ r_{\tau_M} &= \min(\tau_{A,1}/\tau_{M,1}, \tau_{A,2}/\tau_{M,2}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{M,N}) M_0 \\ r_{\omega_V} &= \min(\omega_{A,1}/\omega_{V,1}, \omega_{A,2}/\omega_{V,2}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{V,N}) V_0 \\ r_{\omega_\Omega} &= \min(\omega_{A,1}/\omega_{\Omega,1}, \omega_{A,2}/\omega_{\Omega,2}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{\Omega,N}) \Omega_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

とする。上式の r_{τ_F} 等の数値をそのまま用いて、例えば F と M を式(4.1)を満たすように変化させた場合には、 τ_F の各成分が τ_A の対応する成分よりも大きくなることもあり得るので、以下のように補正を行って、式(4.1)および(4.2)を満たす最大の r_{τ_F} 等の数値を定める。

入力トルク τ と出力節における発生力 $[-F, -M]$ の間には、ヤコビ行列を $[J]$ として、次式が成り立つ。

$$[-F, -M]^T = \{[J]^T\}^{-1} \tau \quad (4.8)$$

さらに、式 (4.1) を考慮すれば、 τ は楕円体の内部となる。この楕円体における τ の各成分 τ_i の絶対値の最大値を $\tau_{i,\max}$ と表し、式 (4.7) で求めた r_{τ_F} および r_{τ_M} を r'_{τ_F}, r'_{τ_M} と表し、新たに r_{τ_F} および r_{τ_M} を

$$\left. \begin{aligned} r_{\tau_F} &= \min(\tau_{A,1}/\tau_{1,\max}, \tau_{A,2}/\tau_{2,\max}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{N,\max}) r'_{\tau_F} \\ &= \min(\tau_{A,1}/\tau_{1,\max}, \tau_{A,2}/\tau_{2,\max}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{N,\max}) \\ &\quad \times \min(\tau_{A,1}/\tau_{F,1}, \tau_{A,2}/\tau_{F,2}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{F,N}) F_0 \\ r_{\tau_M} &= \min(\tau_{A,1}/\tau_{1,\max}, \tau_{A,2}/\tau_{2,\max}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{N,\max}) r'_{\tau_M} \\ &= \min(\tau_{A,1}/\tau_{1,\max}, \tau_{A,2}/\tau_{2,\max}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{N,\max}) \\ &\quad \times \min(\tau_{A,1}/\tau_{M,1}, \tau_{A,2}/\tau_{M,2}, \dots, \tau_{A,N}/\tau_{M,N}) M_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

のように求めれば、これらの数値は $|\tau_i| \leq \tau_{A,i}$ を満たす。

また、 r_{ω_V} および r_{ω_Ω} についても同様に補正する。入力速度 ω と発生速度 $[V, \Omega]$ の間には

$$[V, \Omega]^T = [J]\omega \quad (4.10)$$

が成り立つから、 ω は式 (4.2) および式 (4.10) を満たす楕円体の内部となり、この楕円体における ω の各成分 ω_i の絶対値の最大値を $\omega_{i,\max}$ と表し、式 (4.7) における r_{ω_V} および r_{ω_Ω} を r'_{ω_V} および r'_{ω_Ω} と表して、新たに r_{ω_V} および r_{ω_Ω} を次式により補正する。

$$\left. \begin{aligned} r_{\omega_V} &= \min(\omega_{A,1}/\omega_{1,\max}, \omega_{A,2}/\omega_{2,\max}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{N,\max}) r'_{\omega_V} \\ &= \min(\omega_{A,1}/\omega_{1,\max}, \omega_{A,2}/\omega_{2,\max}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{N,\max}) \\ &\quad \times \min(\omega_{A,1}/\omega_{V,1}, \omega_{A,2}/\omega_{V,2}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{V,N}) V_0 \\ r_{\omega_\Omega} &= \min(\omega_{A,1}/\omega_{1,\max}, \omega_{A,2}/\omega_{2,\max}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{N,\max}) r'_{\omega_\Omega} \\ &= \min(\omega_{A,1}/\omega_{1,\max}, \omega_{A,2}/\omega_{2,\max}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{N,\max}) \\ &\quad \times \min(\omega_{A,1}/\omega_{\Omega,1}, \omega_{A,2}/\omega_{\Omega,2}, \dots, \omega_{A,N}/\omega_{\Omega,N}) \Omega_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

r_{τ_F} および r_{τ_M} は τ_A により、 r_{ω_V} および r_{ω_Ω} は ω_A により定まるが、ここで重要なのは τ_A に対する r_{τ_F}, r_{τ_M} および ω_A に対する $r_{\omega_V}, r_{\omega_\Omega}$ の数値であるから、 τ_A および ω_A の各成分は、機構設計時において実際のアクチュエータや減速機を想定した具体的な数値である必要はなく、それらの比、例えば $\tau_{A,k}, \omega_{A,k}$ ($k = 1, 2, \dots, N$) をそれぞれ $\tau_{A,1}, \omega_{A,1}$ に対する比で表せば十分である。

4・4 動力伝達指数

前節までの議論により、ロボットの出力節において発生する力・モーメントおよび並進速度・角速度に関する空間的等方性を考慮した拘束条件式をアクチュエータの出力限界を考慮して設定することができた。本節では、与えられた出力節のポーズにおける出力の空間的等方性の評価量として動力伝達指数を定義する。なおここでは、ロボット機構

は3次元空間内を運動し、アクチュエータ数は $N = 6$ とする。また、出力節に伝達される動力の最大値を考えるので、式(4.1)および(4.2)の不等式条件のうち等式条件が成り立つ場合のみを考える。

まず、与えられたポーズにおいて式(4.9)および式(4.11)により $r_{\tau_F}, r_{\tau_M}, r_{\omega_V}, r_{\omega_\Omega}$ を求める。次に、式(4.2)を満たす一つの出力節の速度 $[V, \Omega]_D^T$ を考える。この速度に対するアクチュエータの発生速度 ω_D は式(4.10)より

$$\omega_D = [J]^{-1}[V, \Omega]_D^T \quad (4.12)$$

で求められ、 ω_D の成分を対角成分に順に並べた対角行列を $[\omega_D]$ と表す。一方、式(4.1)を満たす発生力・モーメント $[-F, -M]^T$ に対するアクチュエータの発生力 τ は式(4.8)より

$$\tau = -[J]^T[F, M]^T = -[J]^T[W][\bar{F}, \bar{M}]^T$$

で求められる。ここに、

$$[W] = \begin{bmatrix} r_{\tau_F} & & & & & \\ & r_{\tau_F} & & & & \\ & & r_{\tau_F} & & & \\ & & & r_{\tau_M} & & \\ & & & & r_{\tau_M} & \\ & & & & & r_{\tau_M} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$|\bar{F}|^2 + |\bar{M}|^2 = 1 \quad (4.14)$$

であり、 $\bar{F} = [\bar{F}_X, \bar{F}_Y, \bar{F}_Z]$, $\bar{M} = [\bar{M}_X, \bar{M}_Y, \bar{M}_Z]$ である。したがって、アクチュエータの発生動力のベクトル $P = [P_1, P_2, \dots, P_6]^T$ は

$$P = [\omega_D]\tau = -[\omega_D][J]^T[W][\bar{F}, \bar{M}]^T \quad (4.15)$$

で求められる。

各アクチュエータの発生動力の総和と出力節の出力動力は等しく、これを P で表す。ここで、

$$[H] = -[\omega_D][J]^T[W] \quad (4.16)$$

なる行列 $[H]$ の成分を $h_{i,j} (i, j = 1, 2, \dots, 6)$ と表せば、 P は次式で表される。

$$\begin{aligned} P = \sum_{i=1}^6 P_i &= \sum_{i=1}^6 h_{i,1} \bar{F}_X + \sum_{i=1}^6 h_{i,2} \bar{F}_Y + \sum_{i=1}^6 h_{i,3} \bar{F}_Z \\ &+ \sum_{i=1}^6 h_{i,4} \bar{M}_X + \sum_{i=1}^6 h_{i,5} \bar{M}_Y + \sum_{i=1}^6 h_{i,6} \bar{M}_Z \end{aligned} \quad (4.17)$$

ここで、式 (4.14) および (4.17) より P は発生力の方向により変化し、 $[\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}]_D^T$ に平行な方向の発生力のとき最大値 $P_{O,\max}$ をとる。 $P_{O,\max}$ は次式で表される。

$$P_{O,\max} = \sqrt{\sum_{j=1}^6 \left(\sum_{i=1}^6 h_{i,j} \right)^2} \quad (4.18)$$

また、入力動力の最大値は各アクチュエータの発生動力の最大値 $\tau_{A,i} \omega_{A,i}$ の総和であると考えられるから、次式の η_D を $[\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}]_D^T$ の方向に発生可能な動力の大きさを表す指数として定義する。

$$\eta_D = P_{O,\max} / \sum_{i=1}^6 \tau_{A,i} \omega_{A,i} \quad (4.19)$$

並進運動のみを行う場合に発生可能な動力の大きさを表す指数 $\eta_{D,T}$ および角運動のみを行う場合に発生可能な動力の大きさを表す指数 $\eta_{D,R}$ はそれぞれ次式で表され、

$$\eta_{D,T} = r_{\tau_F} r_{\omega_V} / \sum_{i=1}^6 \tau_{A,i} \omega_{A,i} \quad (4.20)$$

$$\eta_{D,R} = r_{\tau_M} r_{\omega_\Omega} / \sum_{i=1}^6 \tau_{A,i} \omega_{A,i} \quad (4.21)$$

与えられたポーズにおける η_D の最大値 $\eta_{D,\max}$ 、最小値 $\eta_{D,\min}$ はそれぞれ $\eta_{D,T}$ と $\eta_{D,R}$ の数値のうちの大きい方と小さい方に一致する。

そして、全方向に発生可能な動力の大きさに基づく $\eta_{D,\min}$ をそのポーズにおける出力の空間的等方性を表す代表値として採用し、これを動力伝達指数と呼び、 η で表し、次式により定義する。

$$\eta = \eta_{D,\min} \quad (4.22)$$

この指数 η はロボット機構の形式・寸法・アクチュエータの出力限界により決定される。 η は 0 ～ 1 の間の数値をとる無次元量であり、1 に近いほど出力節において大きな力および速度が全方向に発生でき、全方向に大きな出力動力が得られること、すなわち出力の空間的等方性に優れていることを表している。また、 η は機構の形式・寸法、アクチュエータの数・最大発生力・最大発生速度が異なっても共通に適用できる。指数 η は従来の機構評価量と異なり、アクチュエータの出力限界に依存することが特徴である。パラレルメカニズムにおいて、 η は出力節上の出力点の位置に依存するが、このことは運動伝達指数と異なる点である。さらに、対象とするポーズがパラレルメカニズムとシリアルメカニズムに共通の特異点、パラレルメカニズムの特異点のいずれかの位置にある場合、出力節の発生力のアクチュエータの発生力に対する比あるいは出力節の発生速度のアクチュ

エータの発生速度に対する比は零となるが、これは即ち $r_{TF}, r_{TM}, r_{wV}, r_{w\Omega}$ のうちいずれかの数値が零となることであるから $\eta = 0$ となる。以上より、ここで提案した動力伝達指数 η は形式および寸法の異なる機構間での特性比較、アクチュエータの能力を考慮した最適機構の設計および特異点の位置の算出に有用である。

4・5 3 自由度平面機構の評価

本節では、図 4.1 に示す回転対偶のみからなる 2 種類の 3 自由度平面機構を具体的にとりあげ、4・4 節で提案した動力伝達指数 η を計算し、これと第 2 章で定義した運動伝達指数および吉川が提案した可操作度⁽¹⁰⁴⁾ の関係について検討を加える。

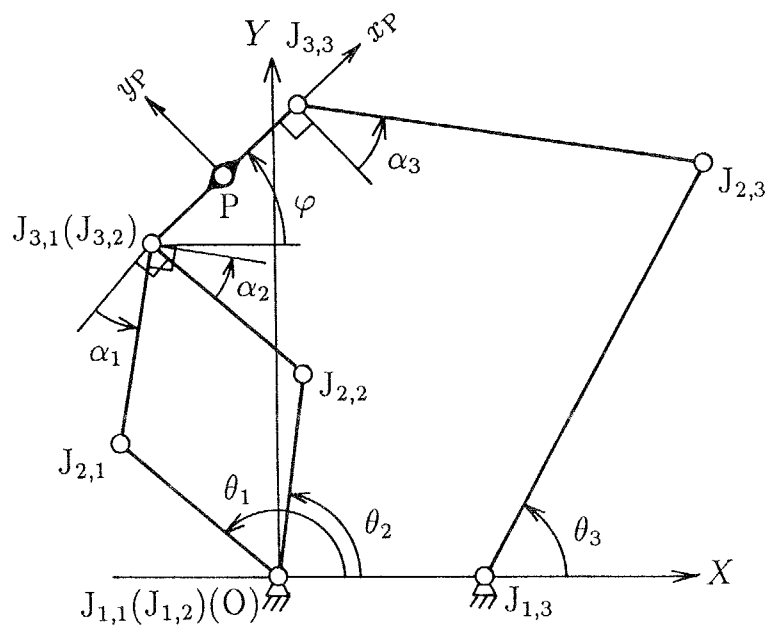
図 4.1(a) において、節 $J_{1,i}, J_{2,i}$ が入力節であり、 $J_{1,i}$ が駆動対偶である。一方、同図 (b) において、 $J_i (i = 1, 2, 3)$ はすべて駆動対偶である。図 4.1 において、入力角変位、角速度および駆動トルクをそれぞれ $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T, \omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$ および $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ で表す。出力節上の点 P が出力点であり、その位置および並進速度を出力節上の点 P の静止座標系 $O - XY$ 上の位置 (X_P, Y_P) とその時間微分 (V_X, V_Y) で表し、出力節の姿勢および角速度を出力節に固定された動座標系 $P - x_P y_P$ の x_P 軸が X 軸となす角 φ およびその時間微分 Ω で表す。出力節で発生する力・モーメントを点 P における X および Y 軸方向の発生力 $[-F_X, -F_Y]$ および XY 平面に垂直な軸回りの発生モーメント $-M$ で表す。

式 (4.1), (4.2) における F, M, V, Ω はそれぞれ $F = [F_X, F_Y]^T, M = [M], V = [V_X, V_Y]^T, \Omega = [\Omega]$ であり、また、図 4.1(a) の機構の運動伝達指数 TI は同図 (a) に示す角 α_i を用いて、

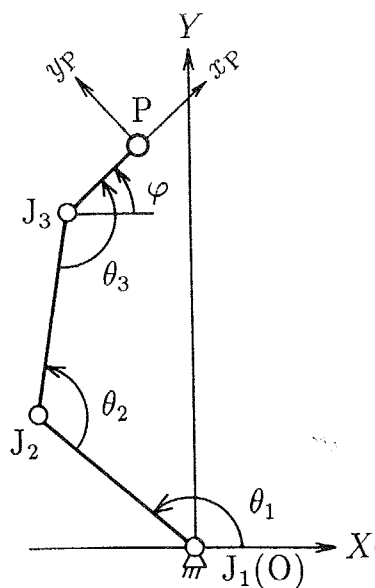
$$TI = \min(\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \cos\alpha_3) \quad (4.23)$$

で表され、可操作度 w は次式で表される。

$$w = |\det[J]| \quad (4.24)$$



(a) パラレルメカニズム



(b) シリアルメカニズム

図 4.1 3 自由度平面機構

図 4.1 の (a) パラレルメカニズムおよび (b) シリアルメカニズムの作業領域が同一となる機構寸法を考え、表 4.1 の寸法を有する機構をとりあげる。まず、 τ_A および ω_A として表 4.2 の数値を与えたときの解析結果を示す。出力節の姿勢が $\varphi = 0^\circ$ および $\varphi = 60^\circ$ における作業領域内の動力伝達指数 η 、運動伝達指数 TI (図 4.1(a) のパラレルメカニズムのみ)、可操作度 w の分布を図 4.2 ~ 4.6 に示す。

図 4.2 および 4.5 より、動力伝達指数 η はロボット機構の形式、出力節の位置・姿勢により大きく異なることがわかる。これらの図に示した指数 η はほとんどの位置において $\eta_{D,T}$ に一致している。これは r_{τ_F} および r_{ω_V} の数値が出力点位置における 2 次元平面内の最も特性が劣る方向により決定されるのに対し、 r_{τ_M} および r_{ω_Ω} は一方向の数値のみによってその数値が決定されることと、表 4.1 の機構の発生力および発生速度の空間的等方性が良くないことによるものであると考えられる。図 4.2 および 4.3 より、 η と TI の分布は一致していないが、傾向が類似していることがわかる。特に、 $TI < 0.2$ のように TI が小さな領域はパラレルメカニズムの特異点の近傍であり、この領域内のほとんどの位置において η は 0.05 以下のきわめて小さな数値をとる。図 4.2 および 4.4 より、この機構では可操作度が小さな $w \leq 0.2$ の領域はパラレル、シリアルメカニズムに共通の特異点の近傍であるが、この領域において η は小さな数値をとる傾向にあり、また可操作度が大きな $w \geq 10$ の領域はパラレルメカニズムの特異点の近傍であり、 η はこの領域においても小さな数値をとることが確認できる。また図 4.5 および 4.6 より、シリアルメカニズムにおける η と w の分布には顕著な類似性は見出せないが、この機構では可操作度が小さな $w < 0.2$ の領域は特異点近傍であるが、この領域において η は 0.05 以下の小さな数値をとることが確認できる。

さらに、図 4.1(a) のパラレルメカニズムについて、駆動対偶 $J_{1,3}$ の減速機の減速比を他の二つに対して大きく想定して τ_A および ω_A を表 4.3 のように変えた場合について、 $\varphi = 60^\circ$ に対する η の分布を図 4.7 に示す。同図においても η はほとんどの位置において $\eta_{D,T}$ に一致する。図 4.7 と図 4.2(b) を比較すると、大まかな分布には大差がないように見えるが、同じ位置においても η の数値は異なり、特に $X \geq 0, Y \geq 0$ の領域において図 4.7 の場合の方が η の数値が大きいことが確認できる。このことは、 r_{τ_F} 、 r_{ω_V} の数値を決定する際の式 (4.7) における $\tau_{A,i}/\tau_{F,i}$ 、 $\omega_{A,i}/\omega_{V,i}$ の数値が表 4.2 の τ_A および ω_A を用いた場合よりも表 4.3 のこれらを用いた場合の方が三つのアクチュエータにおいてより均等化されていることを表している。

以上のことから，出力の空間的等方性に優れたロボット機構を開発するためにはアクチュエータの特性も考慮に入れた動力伝達指数を指標として機構総合を行う必要がある．

表 4.1 機構の寸法

(a) パラレルメカニズム

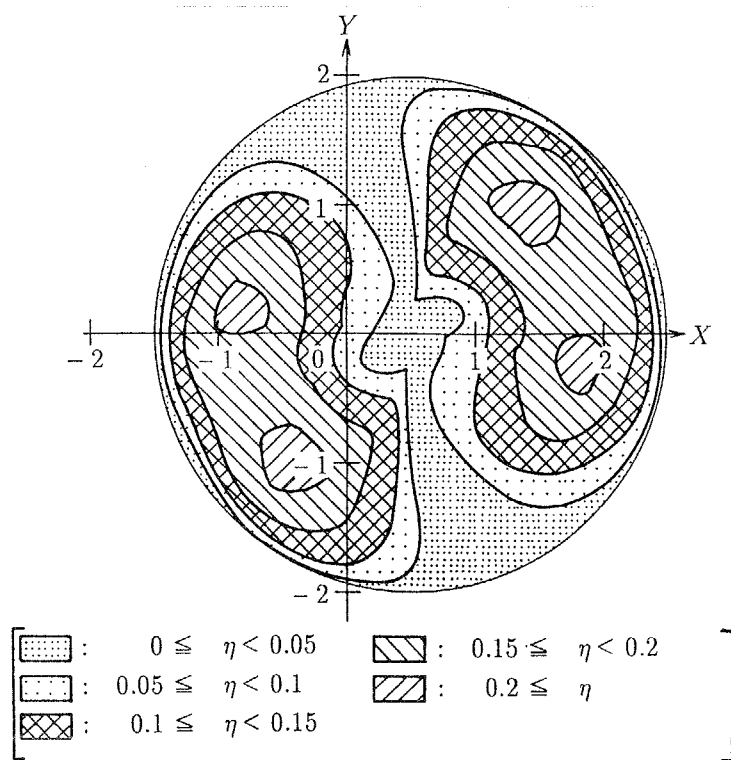
$J_{1,3}$	$(1,0)$
$\overline{J_{1,1}J_{2,1}}$	1
$\overline{J_{2,1}J_{3,1}}$	1
$\overline{J_{1,2}J_{2,2}}$	1
$\overline{J_{2,2}J_{3,2}}$	1
$\overline{J_{1,3}J_{2,3}}$	2
$\overline{J_{2,3}J_{3,3}}$	2
$\overline{J_{3,1}P}$	0.5
$\overline{J_{3,3}P}$	0.5
$\overline{J_{3,1}J_{3,3}}$	1

(b) シリアルメカニズム

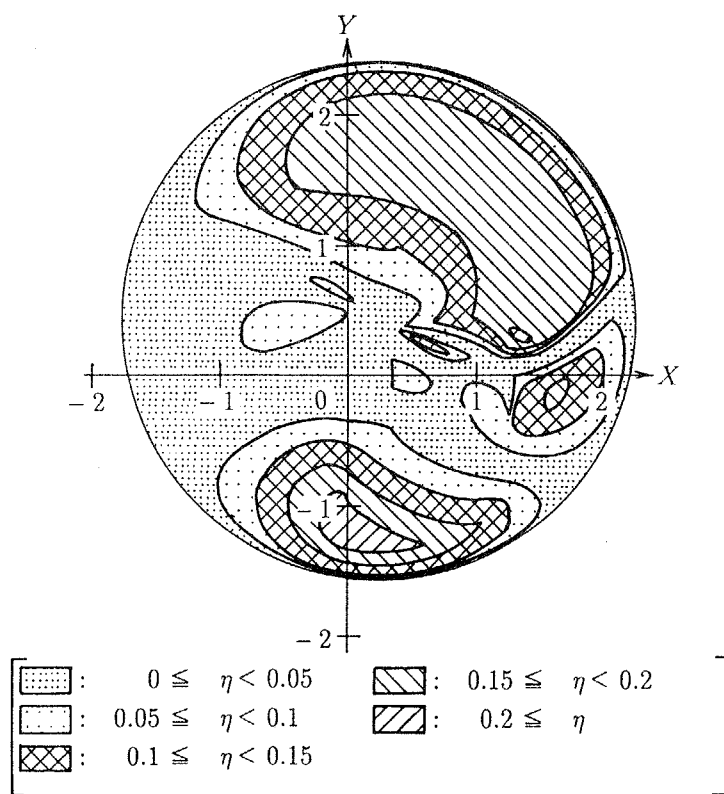
$\overline{J_1J_2}$	1
$\overline{J_2J_3}$	1
$\overline{J_3P}$	0.5

表 4.2 τ_A および ω_A の諸元 (1)

τ_A	$(1.0, 1.0, 1.0)$
ω_A	$(1.0, 1.0, 1.0)$



(a) $\varphi = 0^\circ$



(b) $\varphi = 60^\circ$

図 4.2 パラレルメカニズムの動力伝達指数 η の分布

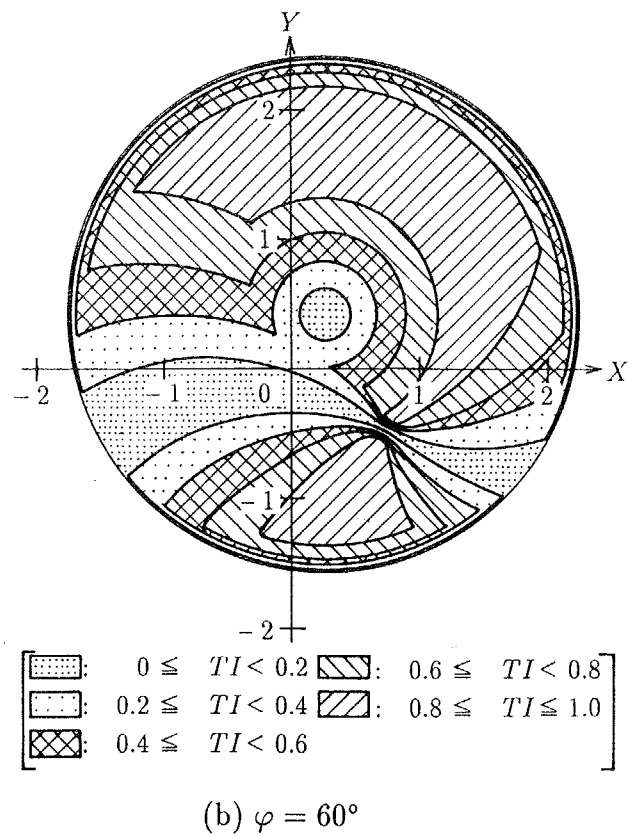
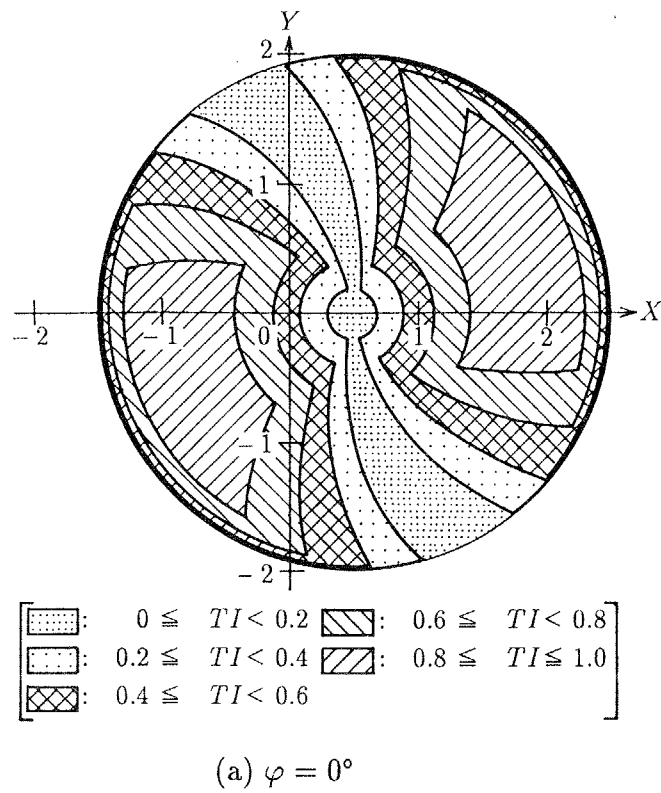
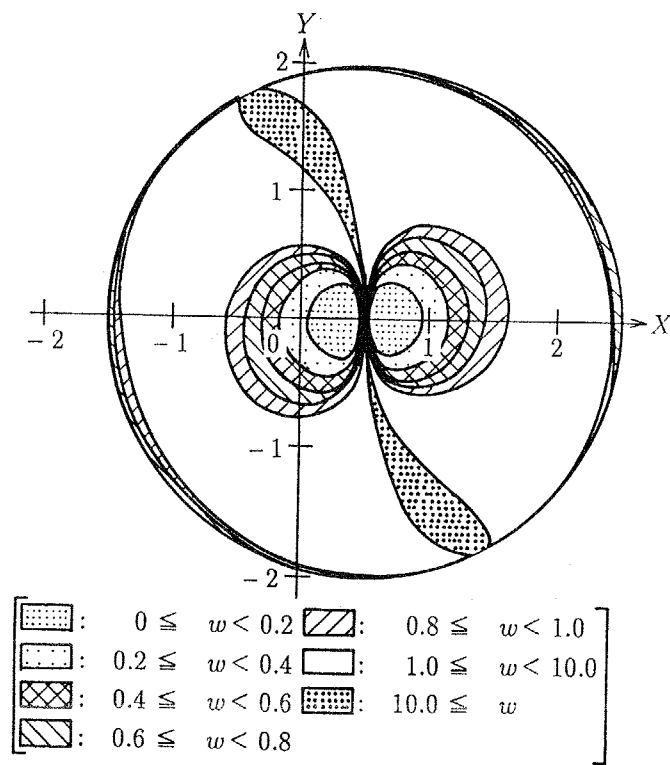
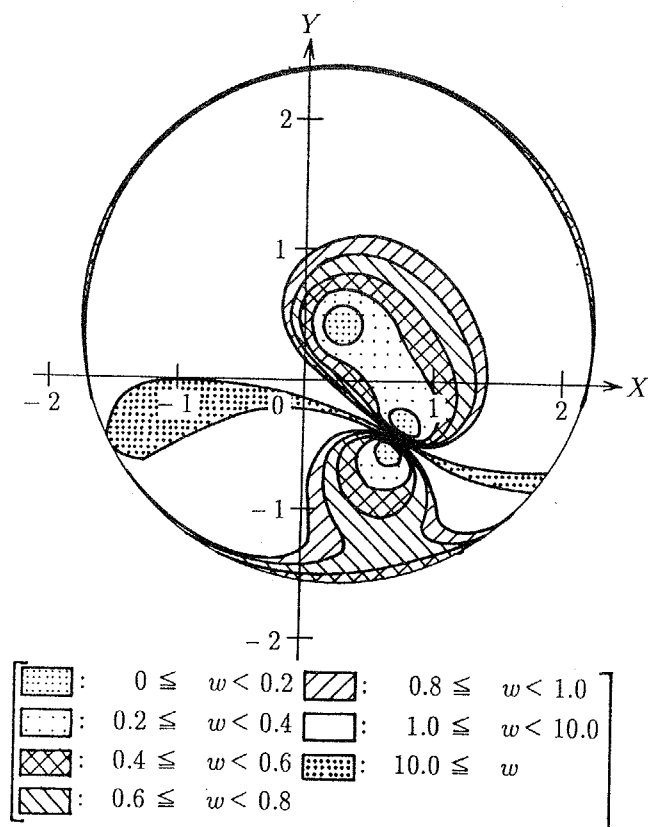


図 4.3 パラレルメカニズムの運動伝達指数 TI の分布



(a) $\varphi = 0^\circ$



(b) $\varphi = 60^\circ$

図 4.4 パラレルメカニズムの可操作度 w の分布

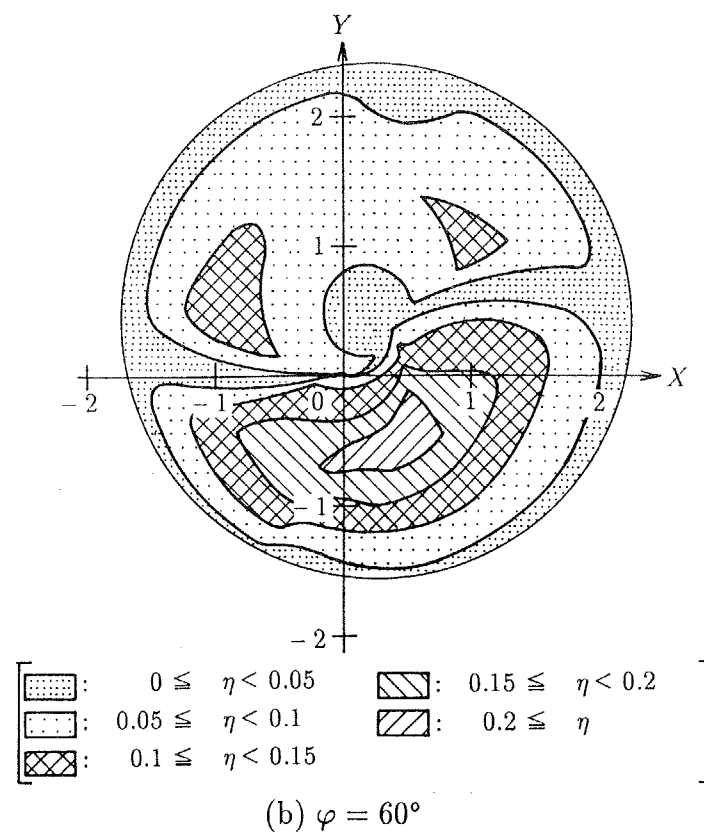
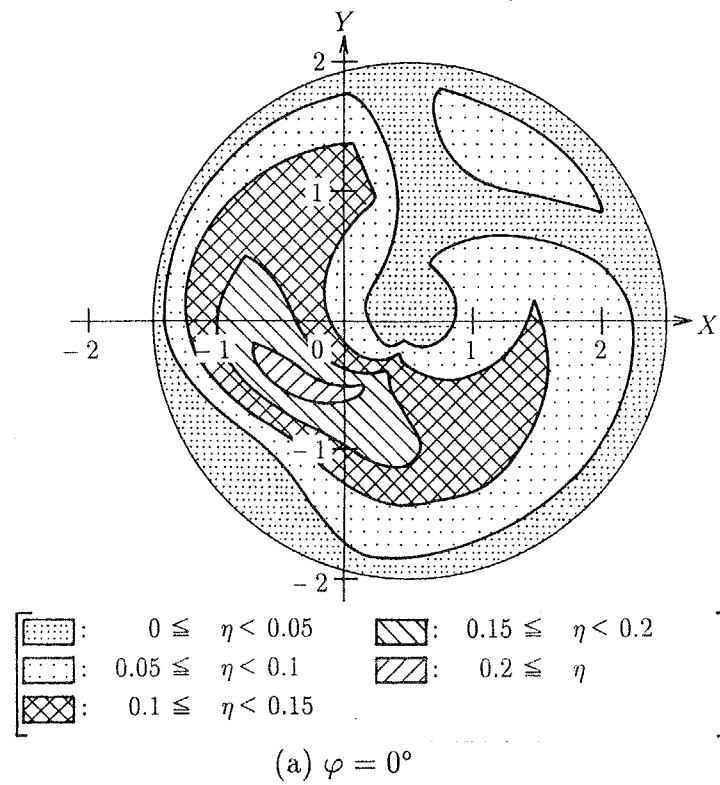
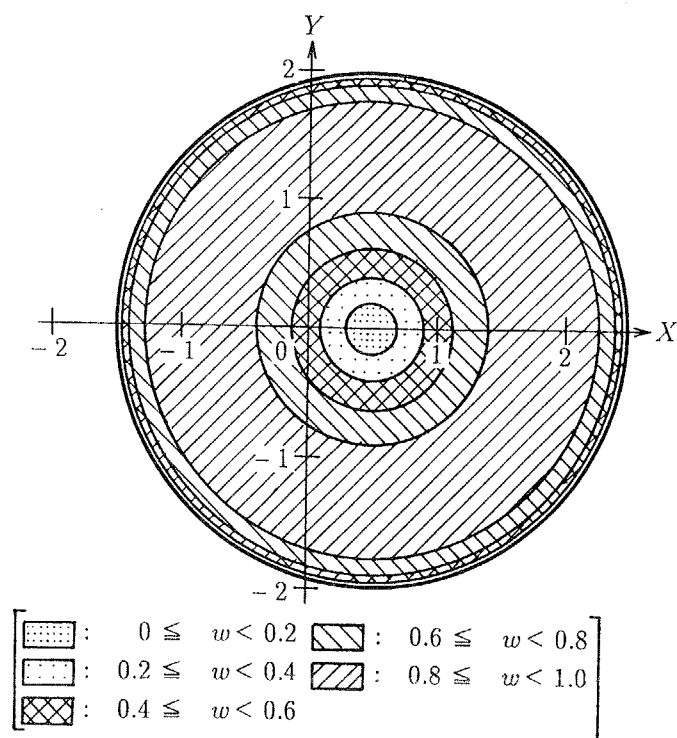
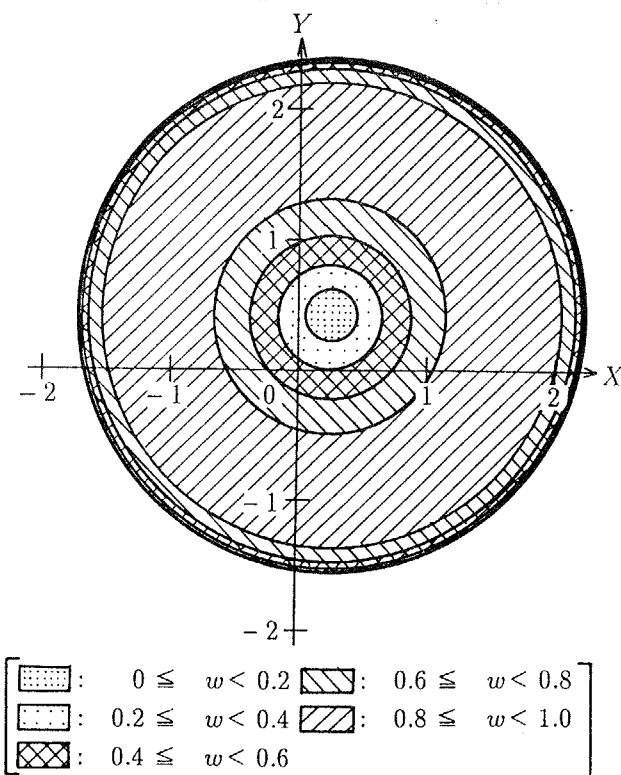


図 4.5 シリアルメカニズムの動力伝達指数 η の分布



(a) $\varphi = 0^\circ$



(b) $\varphi = 60^\circ$

図 4.6 シリアルメカニズムの可操作度 w の分布

表 4.3 τ_A および ω_A の諸元 (2)

τ_A	(1.0, 1.0, 1.33)
ω_A	(1.0, 1.0, 0.75)

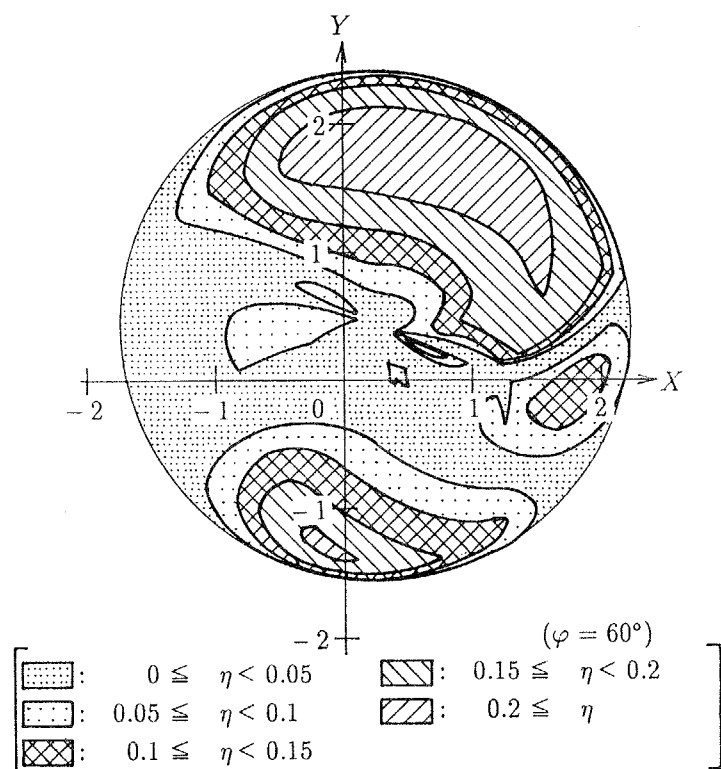


図 4.7 表 4.3 の τ_A , ω_A に対するパラレルメカニズムの動力伝達指数 η の分布 ($\varphi = 60^\circ$)

4・6 結言

本章では、ロボット機構の形式・寸法に関係なく統一的に適用可能な出力の空間的等方性の評価量として動力伝達指数を提案した。得られた結果を要約すれば次の通りである。

(1) ロボットの出力節における異次元の発生力と発生モーメントおよび並進速度と角速度を数値的に等価に扱うことを可能とするために、まずアクチュエータの出力限界により定まる最大全方向発生力・モーメントおよび最大全方向発生並進速度・角速度を提案した。これらの最大全方向発生力、モーメント、並進速度および角速度は、それぞれロボットが力のみ、モーメントのみ、並進速度のみおよび角速度のみを全方向に発生することのできる力、モーメント、並進速度および角速度の最大値である。そして、これらの最大全方向発生力等を用いて空間的等方性を考慮した出力節における発生力と発生速度の拘束条件式を設定した。

(2) 出力節における発生力と発生モーメントおよび並進速度と角速度がそれぞれ(1)項で設定した拘束条件式を満足する場合に出力節に伝達し得る動力の最大値とアクチュエータの最大発生動力の総和の比で定義される出力の空間的等方性の評価指数として、動力伝達指数 η を提案した。この指数 η は、ロボット機構の形式・寸法、アクチュエータの最大発生力・最大発生速度により決定される0～1の間の数値をとる無次元量であり、1に近いほど出力の空間的等方性に優れていることを表す。なお、パラレルメカニズムとシリアルメカニズムに共通の特異点およびパラレルメカニズムの特異点のいずれにおいても $\eta = 0$ となる。

(3) (2)項の特徴を有する動力伝達指数 η は、形式および寸法の異なる機構間の特性比較、アクチュエータの能力を考慮した最適機構の設計および特異点の位置の算出に有用であり、ロボットの機構設計における有効な指標となる。

(4) 動力伝達指数 η を具体的なロボット機構について計算し、従来から提案されている機構評価量と比較・検討した結果、動力伝達指数は出力の空間的等方性に優れたロボット機構開発のための指標として有用であることがわかった。

第5章 モンテカルロ法に基づく機構総合

5・1 緒言

パラレルマニピュレータにおいては、その機構は多くの閉ループを含む多自由度機構であるので、順運動学解析が困難であり、機構定数と運動伝達指数等の機構評価指数との関係を陽に表現することは困難である。このためにパラレルマニピュレータ機構の総合は数多くの機構定数および出力節の位置・姿勢に対する逆運動学解析に基づいて行われることが多い。ところが、従来このようなパラレルマニピュレータ機構の総合法に関してはほとんど論じられていない。基準の機構定数の組から一つの機構定数のみを変化させたときの機構の評価指数の変化を調べることにより、基準の機構よりも優れた機構を得ることはできるが、その機構が大域的な最適機構であることはまずない。また、各種の最適化法の適用による機構総合も考えられるが、得られる最適解は初期値に依存し、しかも真の最適解が得られる保証はない。また、運動伝達指数等の一つの評価指数のみによって求められた唯一の機構定数がそのまま採用されることはほとんどなく、実際のジョイント、アクチュエータ等の大きさ、精度、そしてマニピュレータが達成すべき位置決め精度、速度、最大負荷等を総合的に考慮して機構定数が決定される。そこで、パラレルマニピュレータの機構設計を大きく二つの段階に分け、その第一段階においては一つの評価指数による一つの最適解を見つけずに数値によって機構特性を評価し得る運動伝達指数等の評価指数を用いて、それが許容値以上の優れた運動特性が得られる機構定数の領域（独立峰領域）を効率よく抽出し、その後の第二段階においてその抽出された領域内の数多くの機構を対象として種々の観点から詳細な評価・検討を行って最適機構を得ることを考える。このような方法を用いてパラレルマニピュレータの機構設計を行う場合に、その第一段階において大域的な独立峰領域の抽出を行う際にはモンテカルロ法が有力な手段となると考えられる。

渡辺ら⁽⁵⁶⁾はモンテカルロ法を利用して平面6節機構の総合を行ったが、その機構総合法は評価関数の大域的な最大値点を求めるのには有効であるが、評価関数の独立峰領域を分離する際にその領域が実際よりも過小に判断される難点がある。そこで本章では、渡辺らが提案したモンテカルロ法を利用した独立峰領域の分離法を改良した手法を提案し、具体的に6自由度空間パラレルマニピュレータ機構をとりあげ、その運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出を行う。そして、その結果をもとにして節の可動範囲、節間の干渉および節の大きさ等をさらに考慮して運動伝達性に優れた機構を総合する。

5・2 独立峰領域の抽出

機構定数が一般に n 個ある機構を考え、それらを設計変数 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ で表す。作業領域内の運動伝達指数 TI の最小値等の一つの $\mathbf{p}$ に対して定まる機構の評価指数を一般に PI と表し、 PI と $\mathbf{p}$ の関係を次式で表す。

$$PI = F(\mathbf{p}) \quad (5.1)$$

ここで、 PI はその数値が大きいほど機構が優れていることを表すものとする。設計変数 p_i の変域は機構総合の制約条件から次のように与えられるとする。

$$p_{Li} \leq p_i \leq p_{Ui} \quad (5.2)$$

各設計変数の変域を統一的に表すために、本論文では次式で定まる $[0,1]$ の区間で変化する $\bar{\mathbf{p}} = (\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_n)$ を用いて式 (5.1) の PI を新たに定義する。

$$\bar{p}_i = \frac{p_i - p_{Li}}{p_{Ui} - p_{Li}} \quad (5.3)$$

$$PI = \bar{F}(\bar{\mathbf{p}}) \quad (5.4)$$

変数 $\bar{p}_i$ と評価指数 PI からなる $n+1$ 次元の空間を考えると、一般に式 (5.4) は多峰性関数であり、図 5.1 のように表される。ここで、 PI の許容値を PI_A と表し、図 5.1 の空間を $PI = PI_A$ なる平面で切断すれば、その切断面は図中の斜線で示すようにいくつかの閉領域に分かれる。このような閉領域上に立つ峰を独立峰、その閉領域を独立峰領域と呼ぶ。本章では独立峰領域を無次元化された設計変数 $\bar{\mathbf{p}}$ に対する n 次元空間の超円で近似して表すことにする。このようにすれば、超円の中心点の座標と半径のみによって一つの独立峰領域を簡便に表すことができる。以下では、 $\bar{\mathbf{p}}$ に対する n 次元空間において議論を進める。渡辺らの方法を改良した独立峰領域の抽出法を以下に示す。

(1) N_C 個の $\bar{\mathbf{p}}$ をランダムに与え、それらの PI を計算して PI_A を超える点 (これを抽出点と呼ぶ) の座標を $\bar{\mathbf{p}}_j = (\bar{p}_{j1}, \bar{p}_{j2}, \dots, \bar{p}_{jn})$ ($j = 1, 2, \dots, N_E$) とする。そして、 $J = N_E$, $k = 1$ とおく。

(2) J 個のすべての点が第 k 位の独立峰に含まれると仮定し、独立峰領域が n 次元空間の超円で近似できるとして、その広がり円の半径 r_k を次式を用いて算出する。

$$r_k = \left(\frac{1}{\pi_n} \frac{J}{N_C} \right)^{1/n} \quad (5.5)$$

ここで、 π_n は n 次元空間における単位半径の超円の面積⁽¹¹³⁾である。

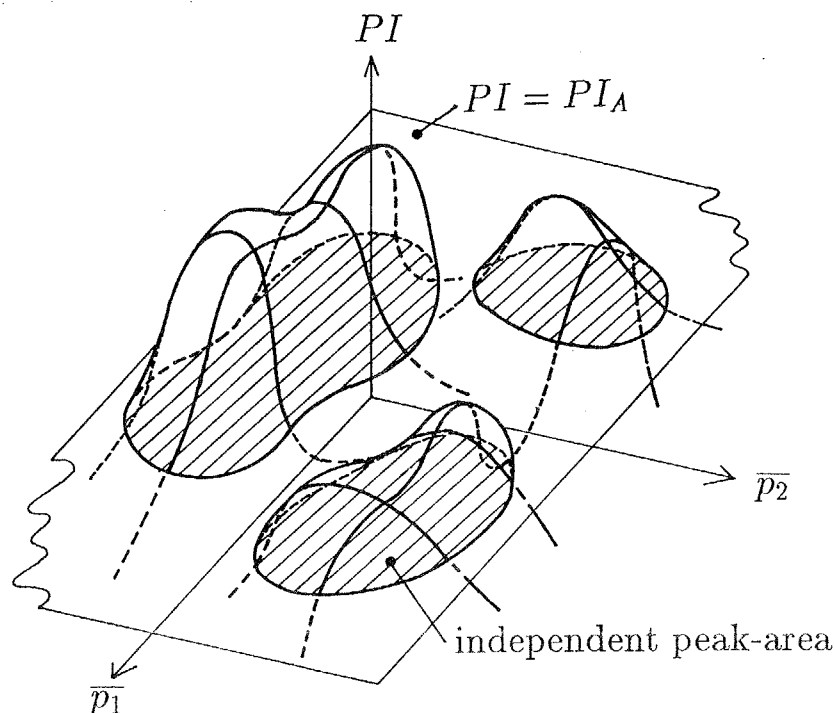


図 5.1 独立峰領域

(3) J 個の点をそれらの点における PI の大きい順に並べ換え、最大値を与える点 $\overline{p}_1$ を代表点とし、この点と他の点 $\overline{p}_j (j = 2, \dots, J)$ の間の距離 d_{1j} を算出し、 d_{1j} が r_k よりも大きい点を除いた点を改めて J 個の点として (2) へもどる。

d_{1j} のすべてが r_k よりも小さい場合には独立峰が分離されたと判断し、 $\overline{p}_1$ を第 k 位の独立峰の代表点 $\overline{p}_k^*$ とし、 $J_k = J$ として次の手順へ進む。

(4) (3) の手順で除かれた抽出点は次位の独立峰に含まれると考え、これらの点のすべてを改めて J 個の点とし、 $k = k + 1$ として (2) へもどる。

除かれた点がない場合には分離が終了したと判断する。

(5) 第 k 位と第 m 位 ($k < m$) の独立峰の代表点間の距離 d_{km}^* を算出し、不等式

$$d_{km}^* < r_k + r_m \quad (5.6)$$

が成立する場合、渡辺らの方法によると第 m 位の独立峰領域の第 k 位の独立峰領域に含まれない領域は削除されてしまうため、最終的に得られる独立峰領域全体の集合は真の領域に比べてかなり小さくなってしまう。これは、 PI の分布が独立峰の代表点に対して対称的でないことが主な原因であると考えられる。一方、(4) の手順で作業を終了してし

まうと、多くの場合数多くの小さな独立峰領域が得られてしまうため、実用的でない。そこで、次の方法を新たに考える。

式 (5.6) が成立する場合、第 k 位および第 m 位の独立峰領域に含まれる抽出点をそれぞれ $\overline{p_{kj}^*} = (\overline{p_{kj1}^*}, \overline{p_{kj2}^*}, \dots, \overline{p_{kjn}^*})$, $\overline{p_{mj}^*} = (\overline{p_{mj1}^*}, \overline{p_{mj2}^*}, \dots, \overline{p_{mjn}^*})$ のように表し、両者の独立峰領域を統合した独立峰領域の代表点 $\overline{p_k'} = (\overline{p_{k1}'}, \overline{p_{k2}'}, \dots, \overline{p_{kn}'})$ を次式で仮定し、

$$\overline{p_{ki}'} = \frac{\sum_{j=1}^{J_k} \overline{p_{kji}^*} + \sum_{j=1}^{J_m} \overline{p_{mji}^*}}{J_k + J_m} \quad (5.7)$$

$(J_k + J_m)$ 個のすべての点が統合した独立峰領域に含まれると仮定して、式 (5.5) の J に $(J_k + J_m)$ を代入して広がり円の半径 r_k' を求める。 J_k 個の点および J_m 個の点の中で $\overline{p_k'}$ と r_k' で定まる独立峰領域に含まれる点の数およびその座標をそれぞれ新たに J_k, J_m および $\overline{p_{kj}^*}, \overline{p_{mj}^*}$ として式 (5.7) より $\overline{p_k'}$ を算出するとともに r_k' を求める。 J_k および J_m が減少しなくなった時点で r_k' と r_k を比較し、

$$r_k' \geq r_k \quad (5.8)$$

が成立するとき、第 k 位の独立峰の代表点 $\overline{p_k^*}$ を $\overline{p_k'}$ に置き換えるとともに、第 m 位の独立峰を削除して、前回までの第 $(m+1)$ 位以降の独立峰の順位を一つずつ繰り上げる。一方、

$$r_k' < r_k \quad (5.9)$$

のとき、第 k 位と第 m 位の峰は独立しているものとみなす。

以上の手順の流れ図を図 5.2 に示す。

5・3 総合対象機構の運動伝達指数の算出式

5・3・1 総合対象の機構

本章では、図 5.3 に示すように静止節と出力節の間に六つの同一の連結連鎖を有し、各連結連鎖が一つの回転対偶 (R) と二つの球対偶 (S) からなり、静止節上の各回転対偶が駆動対偶である形式の 6 自由度空間機構を具体的に対象としてとりあげる。この機構は、Hunt⁽¹¹⁾, Pierrot ら⁽¹¹⁰⁾, 内山ら⁽⁹⁸⁾ もとりあげ、高速ロボット HEXA⁽⁹⁸⁾ が実際に開発されている。

この機構における出力節の位置・姿勢を静止座標系 $O-XYZ$ に対する出力節上の点 P の位置および出力節上に固定された座標系 $P-x_P y_P z_P$ の $O-XYZ$ に対するロール角 φ_R ,

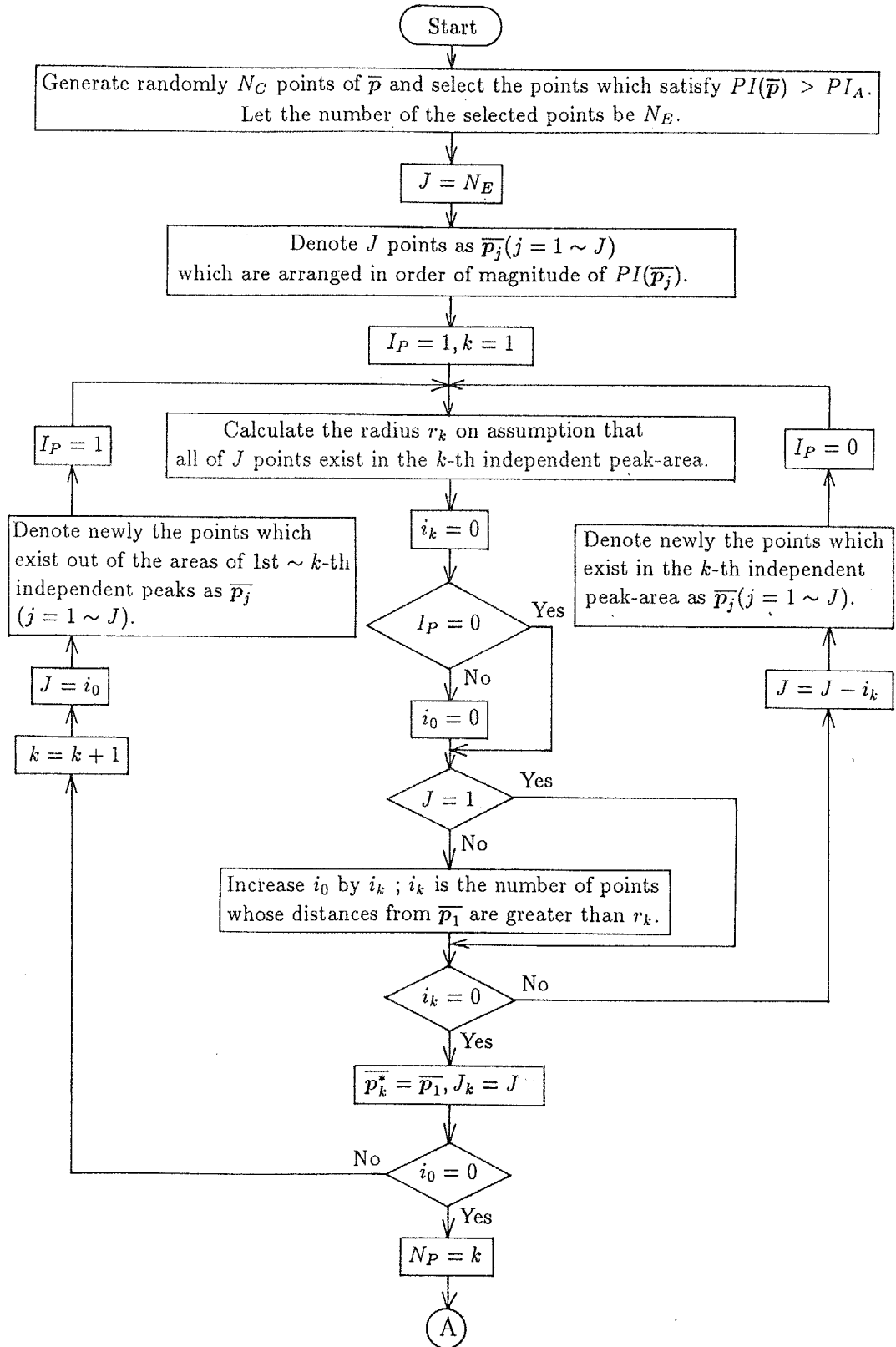


図 5.2 独立峰領域の抽出アルゴリズム (1)

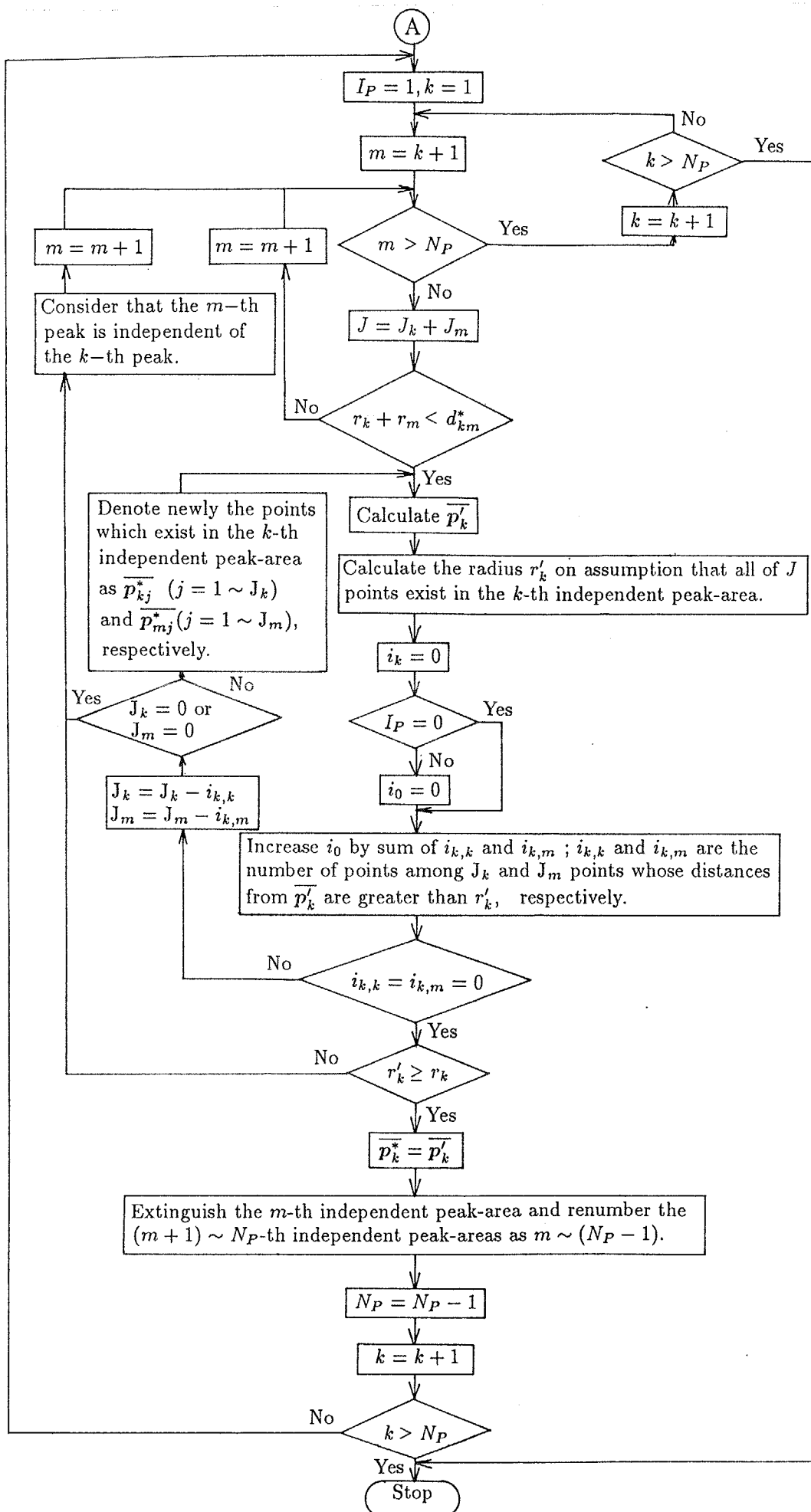


図 5.2 独立峰領域の抽出アルゴリズム (2)

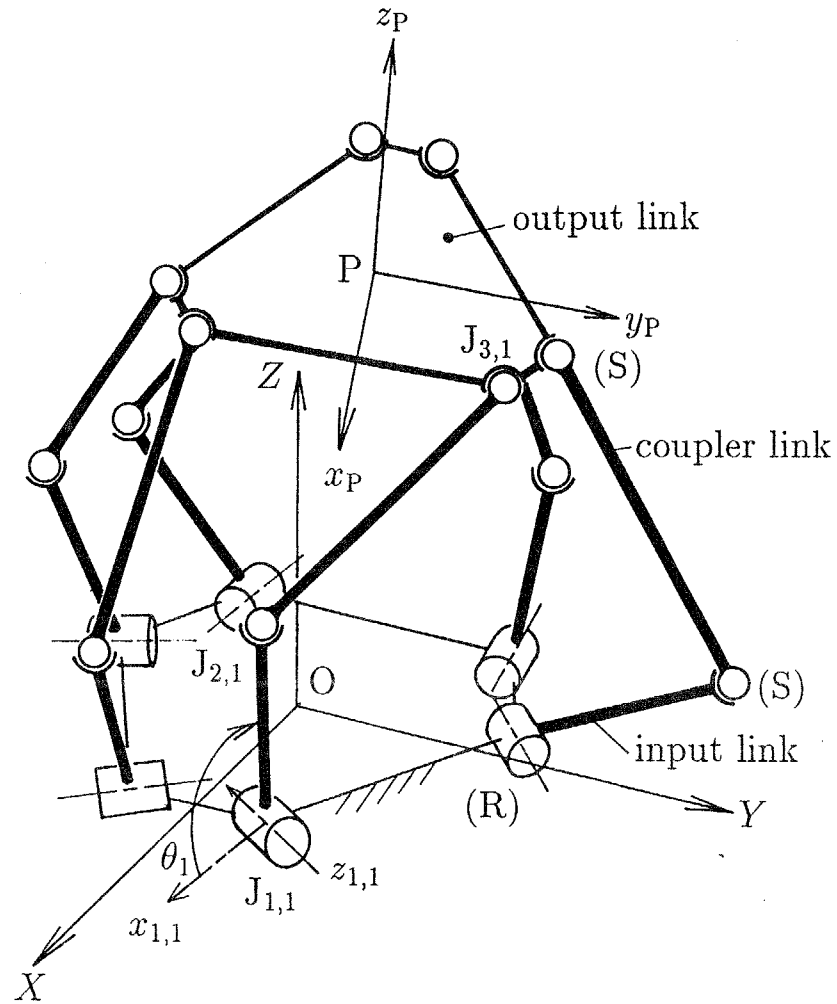


図 5.3 6 自由度空間パラレルマニピュレータ機構

ピッチ角 φ_P , ヨー角 φ_Y で表す. 静止節上に配置された回転対偶点を $J_{1,i} (i = 1, 2, \dots, 6)$, 各連結連鎖内の球対偶点を $J_{2,i}$, 出力節と各連結連鎖の間の球対偶点を $J_{3,i}$, 静止回転対偶軸を $z_{1,i}$ とし $J_{1,i}$ を座標原点とする静止節上に固定された座標系を $J_{1,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ でそれぞれ表し, $\overrightarrow{J_{1,i}J_{2,i}}$ が $x_{1,i}$ 軸となす角を入力角変位としてこれを θ_i で表す.

5・3・2 機構定数

図 5.3 の機構の機構定数としては, 各連結連鎖に対する $J_{1,i}$ の位置 $(X_{1,i}, Y_{1,i}, Z_{1,i})$, 静止座標系 $O - XYZ$ 上で記述されたベクトルを座標系 $J_{1,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ 上のベクトルとして記述するための (3×3) 座標変換行列 $[T_{1,i}]$, 出力節上の座標系 $P - x_Py_Pz_P$ において記述された $J_{3,i}$ の位置 $(x_{3,i}, y_{3,i}, z_{3,i})$, 入力節長 $l_{1,i} = \overline{J_{1,i}J_{2,i}}$, 中間節長 $l_{2,i} = \overline{J_{2,i}J_{3,i}}$ がある. ここでは, 図 5.4 に示すように隣り合った二つの連結連鎖を一組として, 幾何学的対称

性をもつように、静止節上の $J_{1,i}$ を点 O を中心とする半径 R の $Z = 0$ における円周上の β_1 によって定まる位置に配置し、 $x_{1,i}$ および $z_{1,i}$ 軸が XY 平面上にあるとし、 β_2 によって定まる方向に $J_{1,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ を配置し、また $J_{3,i}$ を出力節上の点 P を中心とする半径 r の $z_P = 0$ における円周上の β_3 によって定まる位置に配置する。また、入力節長 $l_{1,i}$ および中間節長 $l_{2,i}$ はそれぞれ連結連鎖間で同一であるとし、これらを単に l_1, l_2 と表す。

以上より、本章で対象とする機構の機構定数は、静止節上の回転対偶点 $J_{1,i}$ の配置円半径 R 、出力節上の球対偶点 $J_{3,i}$ の配置円半径 r 、 $J_{1,i}$ の位置を表す角 β_1 、 $J_{1,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ を規定する角 β_2 、 $J_{3,i}$ の位置を表す角 β_3 、入力節長 l_1 および中間節長 l_2 の合計七つである。

5・3・3 逆変位解析

出力節上の点 P の位置および姿勢 ($X_P, Y_P, Z_P, \varphi_R, \varphi_P, \varphi_Y$) が与えられたとき、 $J_{3,i}$ の位置 $[X_{3,i}, Y_{3,i}, Z_{3,i}]^T$ は次式で求められる。

$$\begin{bmatrix} X_{3,i} \\ Y_{3,i} \\ Z_{3,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + [T]^T \begin{bmatrix} x_{3,i} \\ y_{3,i} \\ z_{3,i} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

ここに、

$$[T] = \begin{bmatrix} C_P C_Y & C_R S_Y + S_R S_P C_Y & S_R S_Y - C_R S_P C_Y \\ -C_P S_Y & C_R C_Y - S_R S_P S_Y & S_R C_Y + C_R S_P S_Y \\ S_P & -S_R C_P & C_R C_P \end{bmatrix}$$

$$C_R = \cos \varphi_R, \quad C_P = \cos \varphi_P, \quad C_Y = \cos \varphi_Y$$

$$S_R = \sin \varphi_R, \quad S_P = \sin \varphi_P, \quad S_Y = \sin \varphi_Y$$

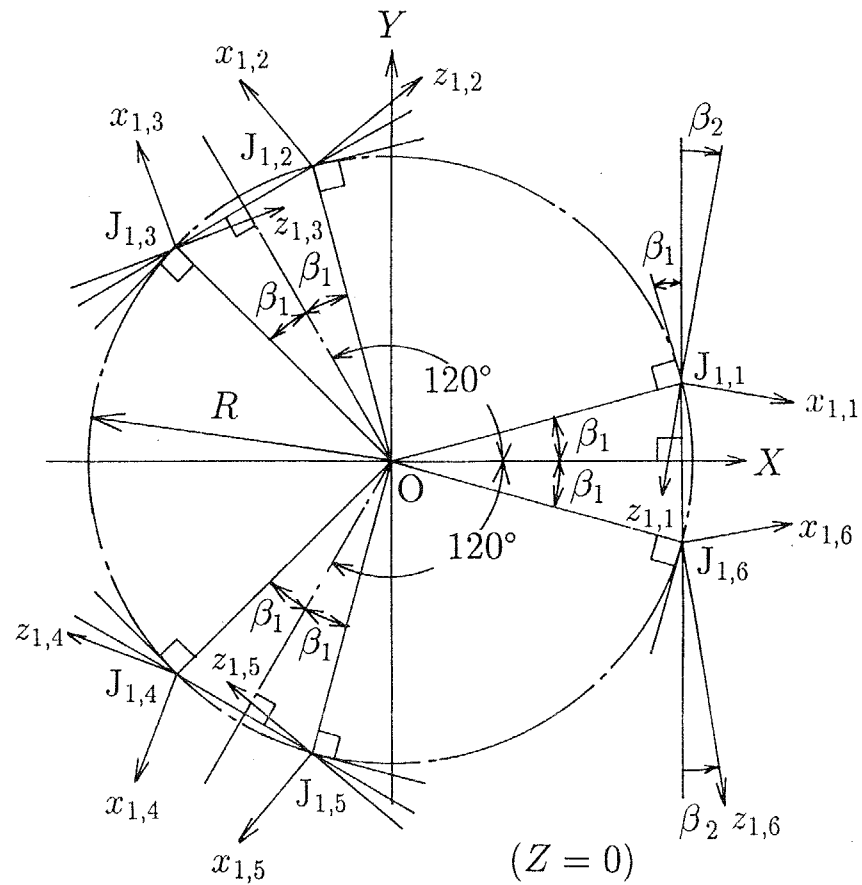
である。そして、 $J_{2,i}$ の位置は $J_{1,i}$ を中心とする半径 l_1 の円と $J_{3,i}$ を中心とする半径 l_2 の球の交点として求められる。

5・3・4 静力学解析およびヤコビ行列

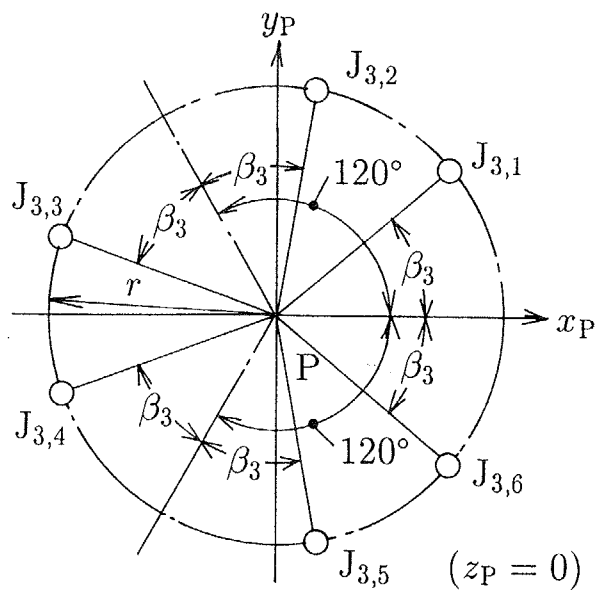
出力節上の点 P に外力として作用する力を $\mathbf{F} = [F_X, F_Y, F_Z]$ 、モーメントを $\mathbf{M} = [M_X, M_Y, M_Z]$ で表し、中間節から出力節へ $J_{3,i}$ において $\overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}}$ 方向の力が作用するが、この力を f_i で表し、まとめて $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_6]^T$ で表す。また、入力トルクを $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6]^T$ で表す。

点 P に外力 $[\mathbf{F}, \mathbf{M}]$ が作用したとき、出力節に働く力とモーメントの釣り合いより、次式が成り立つ。

$$[\mathbf{F}, \mathbf{M}]^T = -[J_1] \mathbf{f} \quad (5.11)$$



(a) 静止節上の対偶配置



(b) 出力節上の対偶配置

図 5.4 静止節上および出力節上の対偶の配置

ここに, $[J_1]$ は 6×6 行列であり, これを

$$[J_1] = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \cdots & \mathbf{a}_6 \\ \mathbf{b}_1 & \cdots & \mathbf{b}_6 \end{bmatrix}$$

のように表せば, $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ は 3 次の列ベクトルであり, それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{a}_i &= \overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}} / \overline{J_{2,i}J_{3,i}} \\ \mathbf{b}_i &= \overrightarrow{PJ_{3,i}} \times \overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}} / \overline{J_{2,i}J_{3,i}} \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

である. また, $J_{1,i} - x_{1,i}y_{1,i}z_{1,i}$ の $z_{1,i}$ 軸を $O-XYZ$ 座標系上で表した方向ベクトル $\mathbf{z}_{1,i}$ を用いれば, τ_i と f_i の間には次式が成り立つから,

$$\tau_i = (\overrightarrow{J_{1,i}J_{2,i}} \times \overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}} / \overline{J_{2,i}J_{3,i}}) \cdot \mathbf{z}_{1,i} f_i = c_i f_i \quad (5.13)$$

c_i を第 i 番目の対角成分にもつ対角行列を $[c]$ と表せば,

$$\boldsymbol{\tau} = -[c][J_1]^{-1}[\mathbf{F}, \mathbf{M}]^T \quad (5.14)$$

が得られ, ヤコビ行列を $[J]$ で表せば, 次式となる.

$$[J]^T = [c][J_1]^{-1} \quad (5.15)$$

5・3・5 運動伝達指数の算出式

入力角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_6]^T$ と出力節上の点 P の並進速度 $\mathbf{V}_P$, 出力節の角速度 $\boldsymbol{\Omega}_P$ の間には次式が成り立つ.

$$[\mathbf{V}_P, \boldsymbol{\Omega}_P]^T = [J]\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (5.16)$$

ヤコビ行列 $[J]$ の成分を $a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 6)$ と表せば, i 番目の入力節のみを駆動するときの点 P の速度 $[\mathbf{V}_{P,i}, \boldsymbol{\Omega}_{P,i}]$ は

$$[\mathbf{V}_{P,i}, \boldsymbol{\Omega}_{P,i}]^T = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i6}]^T \dot{\theta}_i$$

で表され, このときの連結連鎖 i と出力節の連結点 $J_{3,i}$ の速度 $\mathbf{v}_{3,i}$ は

$$\mathbf{v}_{3,i} = \mathbf{V}_{P,i} + \overrightarrow{J_{3,i}P} \times \boldsymbol{\Omega}_{P,i} \quad (5.17)$$

となる. したがって, 連結連鎖 i での圧力角 α_i は点 $J_{3,i}$ における運動方向 $\mathbf{v}_{3,i}$ と力の伝達方向 $\overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}}$ のなす角であるから,

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{v}_{3,i} \cdot \overrightarrow{J_{2,i}J_{3,i}}}{|\mathbf{v}_{3,i}| \overline{J_{2,i}J_{3,i}}} \right\} \quad (5.18)$$

によって求められ、運動伝達指数は

$$TI = \min(\cos\alpha_1, \cos\alpha_2, \dots, \cos\alpha_6) \quad (5.19)$$

によって求められる。

5・4 6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出

本節では、5・2節で提案した手法を5・3節で述べた6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性に優れた機構定数領域(独立峰領域)の抽出に具体的に適用して、その有効性について検討を加えるとともに、設計時に固定される機構定数の条件が独立峰領域の大きさに及ぼす影響を調べる。

5・4・1 問題の設定

まず、静止対偶点の配置円半径を長さの単位にとって $R = 1$ とし、目標とする作業領域として

$$\left. \begin{aligned} X_P^2 + Y_P^2 + (Z_P - 1.7)^2 &\leq 0.6^2 \\ \varphi_R = \varphi_P = \varphi_Y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$

を与え、この目標作業領域内の運動伝達指数 TI の最小値 $TI_{\min}$ を機構の評価指数 PI として採用し、 $PI_A = TI_A = 0.5$ とする。ただし、式(5.20)で表されるすべての点に対して TI を計算することは不可能であるから、次式に示す420点と目標作業領域の中心点 $(0, 0, 1.7)$ の合計421点を作業領域の代表点として採用し、これらの点における TI の最小値を $TI_{\min}$ とする。

$$\left. \begin{aligned} X_P &= R_S \cos\varphi \cos\theta \\ Y_P &= R_S \cos\varphi \sin\theta \\ Z_P &= R_S \sin\varphi + 1.7 \\ \left[\begin{aligned} R_S &= 0.12i_1 \quad (i_1 = 1, 2, \dots, 5) \\ \theta &= \pi i_2 / 6 \quad (i_2 = 1, 2, \dots, 12) \\ \varphi &= -\pi/2 + \pi(i_3 - 1)/6 \quad (i_3 = 1, 2, \dots, 7) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

これらの点の中で一つでも到達できない点がある場合には $TI_{\min} = 0$ とみなす。なお、作業領域の代表点の数が大きければ $TI_{\min}$ の計算精度は高くなるが、 $TI_{\min} \geq 0.5$ のように運動伝達性に優れた機構では作業領域内でその特性が大きく変化することはなく、具体的な検討を加えた後に上記の421点を目標作業領域の代表点として採用した。

次に、各機構定数の変域を次のように設定する。

$$\left. \begin{array}{l} R = 1 = \text{const.} \\ 0.1 \leq r \leq 1.5 \\ 0 \leq \beta_1 \leq 60^\circ \\ -90^\circ \leq \beta_2 \leq 90^\circ \\ 0 \leq \beta_3 \leq 60^\circ \\ 0.2 \leq l_2/l_1 \leq 5 \\ 2.3 \leq l_1 + l_2 \leq 4.6 \end{array} \right\} \quad (5.22)$$

従来開発された HEXA⁽⁹⁸⁾では、これらの機構定数のうちの β_2 および β_3 が機構の入出力関係の単純さの観点から固定あるいは他の機構定数により一意に決定される条件がはじめから設定され、残りの $r, \beta_1, l_2/l_1, l_1 + l_2$ の四つが設計変数とされている。しかし、このようにいくつかの機構定数をはじめから固定して考えることは、機構性能の観点からは必ずしも有効であるとは言えない。そこで、ここではこの HEXA において固定された機構定数の条件および対象とされた設計変数を基準とし、上記の機構定数のうち固定される機構定数の条件および一様乱数により実際に変化させる設計変数の組として、次の4通りの条件 (A) ~ (D) を考える。

条件 (A) β_2 および β_3 に次式の条件を与え、残りの r, β_1, l_1, l_2 の四つの機構定数を設計変数として式 (5.22) の範囲で変化させる。

$$\left. \begin{array}{l} \beta_2 = 0 \\ \beta_3 = \sin^{-1}(R \sin \beta_1 / r) \end{array} \right\} \quad (5.23)$$

これは、HEXA^{(98),(110)}に相当する。この β_2 と β_3 の条件により、組をなす二つの連結連鎖の入力角変位が互いに同一となるように駆動するとき出力節は回転することなく $\varphi_R = \varphi_P = \varphi_Y = 0$ を保った並進運動を行うという入出力関係の単純化を図ることができる。

条件 (B) β_2 のみに $\beta_2 = 0$ の固定条件を与え、残りの $r, \beta_1, \beta_3, l_1, l_2$ の五つの機構定数を設計変数として式 (5.22) の範囲で変化させる。

条件 (C) β_3 のみに $\beta_3 = \sin^{-1}(R \sin \beta_1 / r)$ の条件を与え、残りの $r, \beta_1, \beta_2, l_1, l_2$ の五つの機構定数を設計変数として式 (5.22) の範囲で変化させる。

条件 (D) すべての機構定数を設計変数として式 (5.22) の範囲で変化させる。

5・4・2 計算結果

まず、機構定数の組の数 N_C と抽出点の数 N_E の N_C に対する比の関係を図 5.5 に示す。同図より、固定される機構定数および設計変数の条件によって運動伝達性に優れた機構

の割合が大きく異なり、特に β_2 を設計変数に含む条件 (C) が最も運動伝達性に優れる割合が高く、次に β_2 および β_3 を設計変数に含む条件 (D) が優れ、従来^{(98),(110)}設計変数に取り上げられてこなかった角 β_2 、すなわち入力節の回転軸方向を表す角がこの機構の運動伝達性に大きく寄与することがわかる。また、同図より、 N_C に対して N_E/N_C はほとんど変化しないことがわかる。そこで以下では、 $N_C = 50000$ に対して独立峰領域の抽出を行うことにする。

独立峰の数を N_P 、抽出点のうち独立峰領域の抽出を行った後に独立峰領域に含まれる抽出点の総数を N_{EP} と表すとき、各条件 (A) ~ (D) について N_P 、 N_{EP} 、 N_E および N_{EP}/N_E を表 5.1 に示す。同表において括弧内の数値は渡辺らの方法による結果である。また、各独立峰領域内に含まれる抽出点の $TI_{\min}$ の最大値を TI_P と表し、 TI_P の大きい順に並べかえた独立峰の番号を i_P ($i_P = 1, 2, \dots, N_P$) と表すとき、 i_P と TI_P および独立峰領域の面積の総和 S_P の関係を図 5.6 に示す。同図において、太線は本論文で提案する方法による結果であり、細線は渡辺らの方法による結果である。なお、 S_P は次式により算出される。

$$S_P = \sum_{k=1}^{i_P} \pi_n r_k^n \quad (5.24)$$

表 5.1 より、いずれの条件 (A) ~ (D) に対しても本章で提案する方法の方が従来の方法に比べて、独立峰の数 N_P 、独立峰領域に含まれる抽出点の総数 N_{EP} 、一つの独立峰に含まれる抽出点の数の平均値 N_{EP}/N_P および独立峰領域に含まれる抽出点の総数の抽出点の総数に対する比 N_{EP}/N_E が大きく、運動伝達性に優れた機構定数領域をより適切に表現できていることがわかる。また、図 5.6 より、同一の順位までの独立峰によって比較を行っても、本論文で提案した方法の方が運動伝達性および独立峰領域の大きさの両点において優れていることがわかる。以上より、提案した方法が機構設計時の運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出に有効であることがわかる。

次に条件 (A) ~ (D) の間で運動伝達性および独立峰領域の大きさに関して、 TI_P および S_P により比較を行う。図 5.6(a) における TI_P の比較により、いずれの順位の独立峰に対しても、すべての機構定数を設計変数とする条件 (D) が最も優れ、設計変数の数が同一の条件 (B) と条件 (C) の間では β_3 のみを $\beta_3 = \sin^{-1}(R \sin \beta_1 / r)$ に固定して β_2 を設計変数に含む条件 (C) の方が β_2 のみを $\beta_2 = 0$ に固定して β_3 を設計変数に含む条件 (B) よりも優れ、 β_2 および β_3 を式 (5.23) により固定した条件 (A) は他に比べて劣っていることがわかる。また、図 5.6(b) における S_P の比較により、少ない数の独立峰領域で効率よく運動伝達性に優れた機構定数領域を表現する場合には i_P に対する S_P の立ち上がりが急峻な

条件 (C) と条件 (A) が優れ、運動伝達性に最も優れておりすべての機構定数を設計変数とする条件 (D) でこれらの機構と同等あるいはそれ以上の機構定数領域を得るためには、より多くの独立峰を対象としなければならないことがわかる。

さらに、各条件 (A) ～ (D) に対する運動伝達性に優れた機構定数領域の一部を $i_P = 1 \sim 40$ について表 5.2 に示す。同表における $(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_6)$ の各成分はそれぞれ、 $r, \beta_1, \beta_2, \beta_3, (l_2/l_1), (l_1 + l_2)$ に対して式 (5.3) により定義された設計変数である。

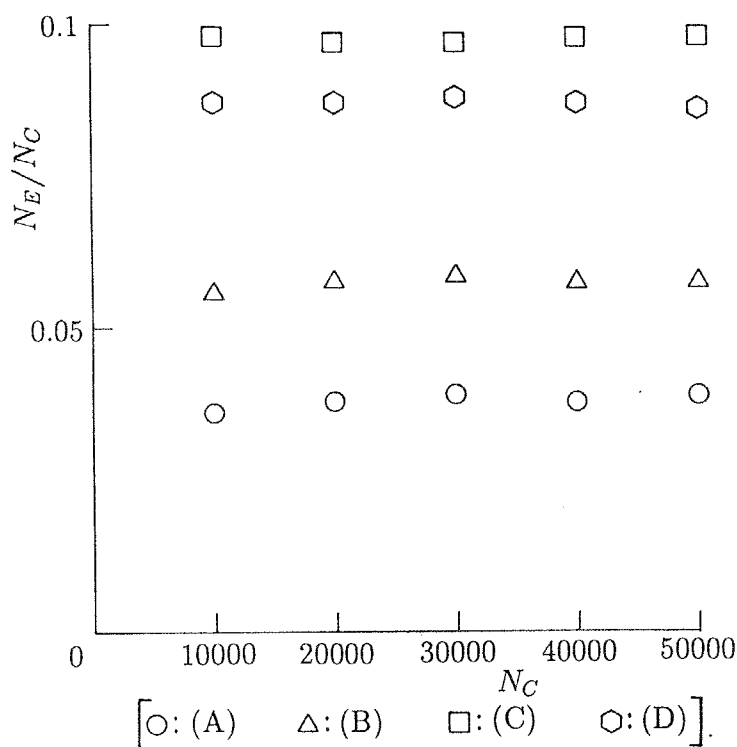
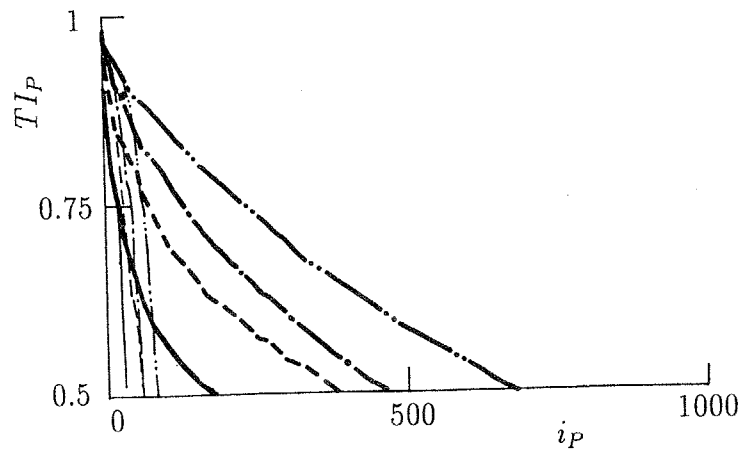


図 5.5 N_C と N_E/N_C の関係

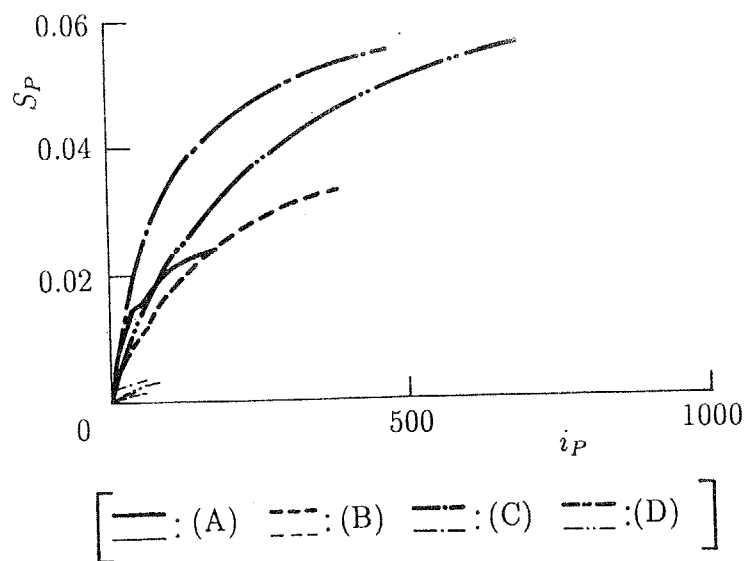
表 5.1 $N_P, N_{EP}, N_E, N_{EP}/N_P$ および N_{EP}/N_E

	(A)	(B)	(C)	(D)
N_P	180(39)	384(58)	467(57)	690(82)
N_{EP}	1186(86)	1657(90)	2762(173)	2810(167)
N_E	1926	2895	4890	4285
N_{EP}/N_P	6.59(2.21)	4.32(1.55)	5.91(3.04)	4.07(2.04)
N_{EP}/N_E	0.616(0.045)	0.572(0.031)	0.565(0.035)	0.656(0.039)

$N_C = 50000$, () 内の数値は渡辺らの方法による結果を表す。



(a) i_P と TI_P の関係



(b) i_P と S_P の関係

図 5.6 独立峰領域の抽出結果

(太線は本論文の手法による結果, 細線は渡辺らの手法による結果)

表 5.2 運動伝達性に優れた機構定数領域 (1)
条件 (A) に対する結果

i_P	$(\overline{p}_1, \overline{p}_2, \overline{p}_5, \overline{p}_6)$	TI_P	r_{i_P}
1	(0.6124, 0.9278, 0.2879, 0.2874)	0.9076	0.1366
2	(0.6223, 0.9528, 0.2835, 0.4821)	0.8985	0.8974
3	(0.5469, 0.8247, 0.3008, 0.1414)	0.8799	0.1156
4	(0.5930, 0.8418, 0.2566, 0.9095)	0.8783	0.1059
5	(0.4856, 0.6856, 0.3014, 0.5649)	0.8514	0.0960
6	(0.4973, 0.6764, 0.2803, 0.8003)	0.8402	0.0983
7	(0.5961, 0.8176, 0.2694, 0.5641)	0.8379	0.1075
8	(0.4687, 0.6111, 0.3158, 0.1879)	0.8351	0.1485
9	(0.4232, 0.6036, 0.3235, 0.6095)	0.8223	0.0730
10	(0.4932, 0.7663, 0.4675, 0.1053)	0.8141	0.0835
11	(0.3881, 0.5654, 0.3820, 0.3391)	0.8127	0.0817
12	(0.2050, 0.3363, 0.3124, 0.9398)	0.7967	0.0702
13	(0.4455, 0.5552, 0.2849, 0.8803)	0.7871	0.0852
14	(0.3355, 0.5587, 0.2933, 0.7863)	0.7870	0.0635
15	(0.4873, 0.7563, 0.2715, 0.9491)	0.7868	0.0730
16	(0.1582, 0.2768, 0.3978, 0.4458)	0.7860	0.0852
17	(0.2587, 0.3301, 0.4047, 0.1621)	0.7840	0.1175
18	(0.6127, 0.7863, 0.2639, 0.7170)	0.7829	0.0972
19	(0.3825, 0.4802, 0.3219, 0.5594)	0.7751	0.1003
20	(0.0499, 0.1420, 0.4089, 0.3199)	0.7617	0.0671
21	(0.4560, 0.6218, 0.3630, 0.4560)	0.7613	0.0449
22	(0.5600, 0.9882, 0.2480, 0.9741)	0.7609	0.0449
23	(0.0322, 0.1042, 0.5832, 0.1311)	0.7577	0.0534
24	(0.3983, 0.5823, 0.4690, 0.1783)	0.7517	0.0449
25	(0.0521, 0.1403, 0.3727, 0.4576)	0.7505	0.0702
26	(0.3636, 0.4896, 0.4610, 0.0975)	0.7486	0.0897
27	(0.0441, 0.1358, 0.4453, 0.1761)	0.7370	0.0635
28	(0.2931, 0.3886, 0.3345, 0.4604)	0.7340	0.0911
29	(0.3488, 0.4359, 0.2944, 0.8326)	0.7092	0.0817
30	(0.5142, 0.5809, 0.2810, 0.4240)	0.7074	0.1075
31	(0.5491, 0.9201, 0.4668, 0.0760)	0.7050	0.0777
32	(0.6437, 0.9742, 0.2054, 0.5535)	0.7045	0.0671
33	(0.7902, 0.8946, 0.2133, 0.6534)	0.7024	0.1013
34	(0.1283, 0.2208, 0.3775, 0.2486)	0.7012	0.0798
35	(0.7610, 0.9303, 0.2297, 0.9481)	0.7011	0.0852
36	(0.2052, 0.3317, 0.3351, 0.7568)	0.7008	0.0702
37	(0.3761, 0.5745, 0.4044, 0.0504)	0.6992	0.0591
38	(0.3917, 0.4379, 0.3515, 0.3072)	0.6976	0.0883
39	(0.5030, 0.8000, 0.2404, 0.2592)	0.6973	0.0702
40	(0.3464, 0.5412, 0.2936, 0.9825)	0.6969	0.0449

表 5.2 運動伝達性に優れた機構定数領域 (2)
条件 (B) に対する結果

i_P	$(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_4, \bar{p}_5, \bar{p}_6)$	TI_P	r_{i_P}
1	(0.7268, 0.0680, 0.9211, 0.2878, 0.5014)	0.9458	0.1485
2	(0.6588, 0.0819, 0.7821, 0.3661, 0.2667)	0.9416	0.1515
3	(0.9341, 0.1073, 0.6442, 0.3004, 0.3009)	0.9335	0.1543
4	(0.9257, 0.8092, 0.9014, 0.2290, 0.5958)	0.9196	0.1469
5	(0.9507, 0.0328, 0.8804, 0.3785, 0.4676)	0.9183	0.0824
6	(0.7213, 0.4384, 0.8479, 0.2954, 0.3847)	0.9157	0.1816
7	(0.9249, 0.1527, 0.9895, 0.4102, 0.3818)	0.9123	0.1027
8	(0.4946, 0.1398, 0.9542, 0.3546, 0.2952)	0.9093	0.1485
9	(0.8550, 0.0846, 0.7779, 0.2617, 0.8985)	0.9088	0.1397
10	(0.9094, 0.6289, 0.9005, 0.2860, 0.2705)	0.9022	0.1376
11	(0.8834, 0.3077, 0.9215, 0.2732, 0.9375)	0.9017	0.1216
12	(0.9309, 0.0711, 0.5101, 0.2465, 0.7384)	0.8929	0.1515
13	(0.8554, 0.2779, 0.9605, 0.4860, 0.1759)	0.8801	0.1087
14	(0.7388, 0.0582, 0.9662, 0.4239, 0.2077)	0.8774	0.1087
15	(0.6083, 0.1343, 0.9302, 0.2940, 0.9200)	0.8751	0.1249
16	(0.7428, 0.6311, 0.7980, 0.2682, 0.5876)	0.8616	0.1452
17	(0.8919, 0.9016, 0.9183, 0.2277, 0.2889)	0.8572	0.1435
18	(0.9475, 0.1006, 0.7879, 0.4841, 0.2449)	0.8543	0.0947
19	(0.9925, 0.6247, 0.9979, 0.3744, 0.3844)	0.8532	0.0824
20	(0.9024, 0.3121, 0.6206, 0.2611, 0.8186)	0.8521	0.1529
21	(0.7872, 0.4404, 0.7115, 0.2634, 0.7015)	0.8467	0.1306
22	(0.4808, 0.4582, 0.9477, 0.3480, 0.3478)	0.8452	0.1279
23	(0.8169, 0.1588, 0.5462, 0.2986, 0.4328)	0.8441	0.1452
24	(0.8796, 0.5699, 0.8380, 0.2531, 0.8134)	0.8425	0.1376
25	(0.8827, 0.7877, 0.7813, 0.2247, 0.9647)	0.8418	0.1137
26	(0.7630, 0.6815, 0.9609, 0.2802, 0.7545)	0.8406	0.1216
27	(0.6739, 0.2196, 0.9552, 0.2915, 0.4480)	0.8399	0.1027
28	(0.9303, 0.9340, 0.9509, 0.1943, 0.8835)	0.8389	0.1087
29	(0.4603, 0.0745, 0.8247, 0.3270, 0.6855)	0.8370	0.1249
30	(0.7593, 0.4770, 0.9088, 0.2585, 0.9434)	0.8365	0.1087
31	(0.8946, 0.4429, 0.8653, 0.4404, 0.2108)	0.8354	0.1137
32	(0.6028, 0.4395, 0.8581, 0.3368, 0.1431)	0.8347	0.1569
33	(0.7156, 0.2552, 0.6566, 0.2791, 0.9015)	0.8345	0.1279
34	(0.6140, 0.0056, 0.8006, 0.3059, 0.8252)	0.8300	0.0824
35	(0.8536, 0.4384, 0.6826, 0.2600, 0.4021)	0.8285	0.1500
36	(0.5066, 0.0235, 0.9871, 0.3561, 0.5744)	0.8273	0.0824
37	(0.9212, 0.5489, 0.6429, 0.2302, 0.2735)	0.8248	0.1249
38	(0.9812, 0.9174, 0.9648, 0.2017, 0.7575)	0.8216	0.0947
39	(0.3034, 0.0886, 0.8527, 0.3982, 0.1942)	0.8194	0.1435
40	(0.6285, 0.8317, 0.9467, 0.2608, 0.2768)	0.8193	0.1355

表 5.2 運動伝達性に優れた機構定数領域 (3)
条件 (C) に対する結果

i_P	$(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3, \bar{p}_5, \bar{p}_6)$	TI_P	r_{i_P}
1	(0.4056, 0.3178, 0.9065, 0.2610, 0.7361)	0.9711	0.1856
2	(0.3496, 0.3906, 0.7702, 0.2989, 0.5086)	0.9633	0.1658
3	(0.8034, 0.7527, 0.7456, 0.2234, 0.6204)	0.9632	0.1944
4	(0.6389, 0.4427, 0.7265, 0.2341, 0.6721)	0.9585	0.1638
5	(0.5834, 0.5126, 0.8179, 0.2700, 0.4429)	0.9571	0.1959
6	(0.9292, 0.9119, 0.8340, 0.2030, 0.5971)	0.9516	0.1515
7	(0.8939, 0.0801, 0.9011, 0.2245, 0.6971)	0.9510	0.1500
8	(0.8733, 0.1461, 0.9102, 0.2515, 0.4546)	0.9497	0.1569
9	(0.9136, 0.2931, 0.1227, 0.2375, 0.7836)	0.9477	0.1638
10	(0.8614, 0.7579, 0.8332, 0.2167, 0.8724)	0.9468	0.1581
11	(0.3062, 0.1377, 0.9622, 0.2571, 0.9194)	0.9454	0.1279
12	(0.6667, 0.1917, 0.8823, 0.2478, 0.6493)	0.9431	0.1485
13	(0.7192, 0.0757, 0.1393, 0.2357, 0.6897)	0.9363	0.1515
14	(0.2179, 0.0687, 0.8933, 0.2804, 0.6549)	0.9357	0.1435
15	(0.8784, 0.2609, 0.8962, 0.2229, 0.8817)	0.9354	0.1515
16	(0.5737, 0.8634, 0.6386, 0.2612, 0.9035)	0.9333	0.1485
17	(0.4217, 0.4458, 0.9326, 0.2451, 0.9538)	0.9287	0.1179
18	(0.3142, 0.3972, 0.8637, 0.3930, 0.1932)	0.9277	0.1658
19	(0.2193, 0.2797, 0.6082, 0.3641, 0.4445)	0.9172	0.1397
20	(0.6824, 0.1148, 0.8947, 0.2322, 0.9327)	0.9089	0.1376
21	(0.8886, 0.3232, 0.1480, 0.2593, 0.2993)	0.9076	0.1837
22	(0.8043, 0.5289, 0.0952, 0.2422, 0.5764)	0.9064	0.1556
23	(0.5847, 0.0629, 0.9615, 0.2164, 0.7624)	0.9054	0.1137
24	(0.1786, 0.2467, 0.9516, 0.3043, 0.5359)	0.9032	0.0947
25	(0.0577, 0.0974, 0.7758, 0.3483, 0.3901)	0.9012	0.1249
26	(0.8713, 0.2522, 0.7163, 0.2311, 0.6555)	0.9008	0.1376
27	(0.4443, 0.0346, 0.9466, 0.2485, 0.8947)	0.9005	0.1179
28	(0.5039, 0.6681, 0.7015, 0.2997, 0.1659)	0.8989	0.1869
29	(0.8781, 0.6994, 0.1024, 0.2649, 0.2060)	0.8962	0.1875
30	(0.5843, 0.2387, 0.0891, 0.2427, 0.9036)	0.8960	0.1376
31	(0.8373, 0.4420, 0.8702, 0.2327, 0.2538)	0.8946	0.1837
32	(0.1063, 0.1251, 0.7491, 0.2888, 0.9114)	0.8944	0.1306
33	(0.3335, 0.3607, 0.7142, 0.2775, 0.8768)	0.8930	0.1569
34	(0.9264, 0.1937, 0.1789, 0.2498, 0.5897)	0.8906	0.1397
35	(0.6631, 0.4221, 0.9797, 0.2710, 0.6730)	0.8903	0.0947
36	(0.9183, 0.1019, 0.1990, 0.2051, 0.9144)	0.8899	0.1452
37	(0.7771, 0.4953, 0.9360, 0.2147, 0.9252)	0.8826	0.1216
38	(0.8200, 0.1502, 0.9194, 0.3200, 0.2003)	0.8802	0.1627
39	(0.9163, 0.8872, 0.0996, 0.2144, 0.8075)	0.8787	0.1543
40	(0.6426, 0.8839, 0.9152, 0.2518, 0.7263)	0.8780	0.1569

表 5.2 運動伝達性に優れた機構定数領域 (4)
条件 (D) に対する結果

i_P	$(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3, \bar{p}_4, \bar{p}_5, \bar{p}_6)$	TI_P	r_{i_P}
1	(0.8055, 0.7803, 0.8095, 0.4871, 0.2155, 0.7765)	0.9727	0.2113
2	(0.8648, 0.1003, 0.7125, 0.5473, 0.3084, 0.6406)	0.9638	0.1839
3	(0.6480, 0.4027, 0.9678, 0.0396, 0.1717, 0.9890)	0.9598	0.1406
4	(0.5781, 0.7545, 0.7096, 0.8744, 0.2408, 0.9020)	0.9597	0.1869
5	(0.5502, 0.2156, 0.7445, 0.6484, 0.3374, 0.3179)	0.9577	0.2009
6	(0.8194, 0.8714, 0.1531, 0.3608, 0.3262, 0.2782)	0.9569	0.2209
7	(0.4862, 0.4809, 0.9102, 0.5594, 0.2673, 0.4909)	0.9548	0.1968
8	(0.3743, 0.8453, 0.8806, 0.6329, 0.2331, 0.7661)	0.9539	0.1896
9	(0.9166, 0.2786, 0.1413, 0.2214, 0.2396, 0.7342)	0.9539	0.2009
10	(0.3704, 0.8417, 0.9264, 0.1865, 0.1695, 0.7355)	0.9507	0.1989
11	(0.6202, 0.1312, 0.7770, 0.3159, 0.2600, 0.7786)	0.9497	0.1896
12	(0.4830, 0.3314, 0.9306, 0.4102, 0.2503, 0.9072)	0.9489	0.1807
13	(0.8419, 0.5296, 0.8491, 0.1863, 0.2161, 0.8635)	0.9485	0.1839
14	(0.8223, 0.7526, 0.5992, 0.8874, 0.2783, 0.4131)	0.9473	0.1921
15	(0.9207, 0.8976, 0.7574, 0.6754, 0.2270, 0.6911)	0.9469	0.1689
16	(0.2742, 0.7321, 0.7209, 0.7470, 0.2387, 0.9353)	0.9461	0.1807
17	(0.8548, 0.2617, 0.5698, 0.6843, 0.2638, 0.7894)	0.9457	0.1968
18	(0.7303, 0.7816, 0.1354, 0.1461, 0.2957, 0.6770)	0.9444	0.1896
19	(0.8469, 0.5439, 0.7911, 0.4943, 0.2382, 0.3572)	0.9442	0.2183
20	(0.8862, 0.1722, 0.5693, 0.7563, 0.3315, 0.3749)	0.9419	0.2113
21	(0.1216, 0.7115, 0.9553, 0.2875, 0.2136, 0.8351)	0.9397	0.1579
22	(0.1292, 0.0965, 0.8708, 0.6951, 0.4012, 0.2987)	0.9391	0.2028
23	(0.2868, 0.2091, 0.9057, 0.1558, 0.2471, 0.8712)	0.9386	0.1839
24	(0.5300, 0.9797, 0.8838, 0.2567, 0.1875, 0.8015)	0.9385	0.1639
25	(0.3352, 0.5255, 0.9365, 0.2552, 0.2281, 0.6322)	0.9375	0.1968
26	(0.1334, 0.5922, 0.7686, 0.6131, 0.2478, 0.7977)	0.9309	0.1689
27	(0.7849, 0.6570, 0.8373, 0.2346, 0.1854, 0.5503)	0.9299	0.2128
28	(0.8599, 0.1966, 0.6429, 0.3529, 0.2430, 0.3275)	0.9294	0.2028
29	(0.8932, 0.4379, 0.1467, 0.2005, 0.2739, 0.2383)	0.9288	0.1945
30	(0.5519, 0.5211, 0.5521, 0.8875, 0.2827, 0.6268)	0.9288	0.2009
31	(0.4531, 0.3512, 0.7434, 0.9134, 0.4070, 0.1937)	0.9274	0.1869
32	(0.9380, 0.1805, 0.6282, 0.3131, 0.2484, 0.8997)	0.9260	0.1639
33	(0.0757, 0.3350, 0.8929, 0.9277, 0.2807, 0.6577)	0.9247	0.1968
34	(0.1349, 0.3702, 0.8410, 0.4949, 0.2776, 0.5597)	0.9236	0.1968
35	(0.1804, 0.8624, 0.9211, 0.5089, 0.2007, 0.4534)	0.9228	0.1733
36	(0.5709, 0.9435, 0.7778, 0.6134, 0.2024, 0.5767)	0.9217	0.1639
37	(0.2847, 0.3826, 0.7632, 0.3968, 0.2495, 0.9211)	0.9185	0.1689
38	(0.3453, 0.6841, 0.1130, 0.1094, 0.3507, 0.2086)	0.9169	0.2064
39	(0.9378, 0.7256, 0.1698, 0.3050, 0.2479, 0.5433)	0.9164	0.1733
40	(0.6038, 0.3649, 0.0766, 0.0773, 0.2918, 0.1807)	0.9137	0.1989

5・5 6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の総合

本節では、5・4節で明らかになった6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性に優れた機構定数領域から、実用性を考慮した条件を満足する機構の総合を行う。実用性に関して、次の三つの条件を考える。

- (1) アクチュエータ等の駆動源の固定部等の製作の容易さを考慮して、入力節上の動対偶点 $J_{2,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) の Z 座標が常に正であること。すなわち、

$$0 \leq \theta_i \leq \pi \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (5.25)$$

が目標作業領域内で成り立つこと。

- (2) 隣接する入力節同士が、式 (5.25) の範囲で入力節が運動する際に干渉しないこと。すなわち、

$$\left. \begin{array}{ll} -60^\circ < \beta_2 \leq 90^\circ & : |l_1 \sin \beta_2| < R \sin \beta_1 \\ -90^\circ \leq \beta_2 \leq -60^\circ & : -l_1 \sin(60^\circ + \beta_2) < R \sin(60^\circ - \beta_1) \end{array} \right\} \quad (5.26)$$

が成り立つこと。

- (3) 作業の妨害にならないように出力節は大きすぎないこと。具体的には、

$$r < R \quad (5.27)$$

が成り立つこと。

なお、ここでの目標作業領域およびその取扱い法と目標作業領域における運動伝達性の評価法は5・4節におけるそれらと同一である。

対象とする機構定数の組としては、5・4節の計算において最終的な独立峰領域に実際に含まれた抽出点に加えて、各独立峰領域に対してそれぞれの領域内で新たにランダムに発生させた100組の機構定数を考える。

各条件に対して目標作業領域内の運動伝達指数の最小値 $TI_{\min}$ の大きい順に並べたときの上位の10組の機構定数を表5.3に示す。これらの中から、 $TI_{\min}$ の最も大きな条件(D)の第1位の機構定数の組をとりあげ、運動伝達指数 TI の作業領域内の分布を出力節の姿勢角すなわち、ロール角 φ_R 、ピッチ角 φ_P 、ヨー角 φ_Y が $\varphi_R = \varphi_P = \varphi_Y = 0$ の場合について図5.7に示す。同図中の破線の円の内部は目標作業領域、すなわち中心が $(0, 0, 1.7R)$ で半径が $0.6R$ の球であり、 $TI_{\min} = 0.806$ である。同図より、目標作業領域内で良好な運動伝達性が得られる6自由度空間パラレルマニピュレータ機構が総合できたことが確認できる。さらに、この機構の目標作業領域内の動力伝達指数を調べたところ、領域の中

央付近が最も大きく $\eta \simeq 0.16$ であり、領域の外側に向かって η の数値は小さくなり、領域の外周付近では $\eta \simeq 0.1$ であった。この η の数値は 6 自由度空間機構としてはかなり良好であると考えられる。

表 5.3 運動伝達性に優れた機構 (1)

条件 (A) に対する結果

No.	$(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_5, \bar{p}_6)$	$TI_{\min}$
1	(0.5411, 0.7856, 0.2567, 0.1248)	0.6889
2	(0.4432, 0.6153, 0.2915, 0.1297)	0.6762
3	(0.3197, 0.4548, 0.3366, 0.0976)	0.6749
4	(0.4742, 0.6855, 0.2636, 0.1051)	0.6737
5	(0.4769, 0.6939, 0.2576, 0.0822)	0.6606
6	(0.4773, 0.6937, 0.2536, 0.0953)	0.6603
7	(0.4753, 0.6771, 0.2581, 0.1013)	0.6597
8	(0.4905, 0.7003, 0.2473, 0.1043)	0.6501
9	(0.4213, 0.5536, 0.2962, 0.1066)	0.6483
10	(0.4734, 0.6681, 0.2516, 0.0845)	0.6477

条件 (B) に対する結果

No.	$(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_4, \bar{p}_5, \bar{p}_6)$	$TI_{\min}$
1	(0.5995, 0.4007, 0.9241, 0.3010, 0.1223)	0.7892
2	(0.6034, 0.5051, 0.9687, 0.3063, 0.0845)	0.7864
3	(0.5454, 0.1493, 0.7916, 0.3117, 0.1165)	0.7745
4	(0.5721, 0.1429, 0.8217, 0.3048, 0.1505)	0.7683
5	(0.5456, 0.1387, 0.7552, 0.3084, 0.1348)	0.7649
6	(0.4891, 0.1586, 0.8159, 0.3267, 0.1097)	0.7638
7	(0.5289, 0.1540, 0.8324, 0.3107, 0.0847)	0.7547
8	(0.4498, 0.2749, 0.8951, 0.3368, 0.1128)	0.7535
9	(0.5734, 0.2072, 0.7405, 0.2944, 0.1361)	0.7530
10	(0.5501, 0.1754, 0.7947, 0.3012, 0.1673)	0.7524

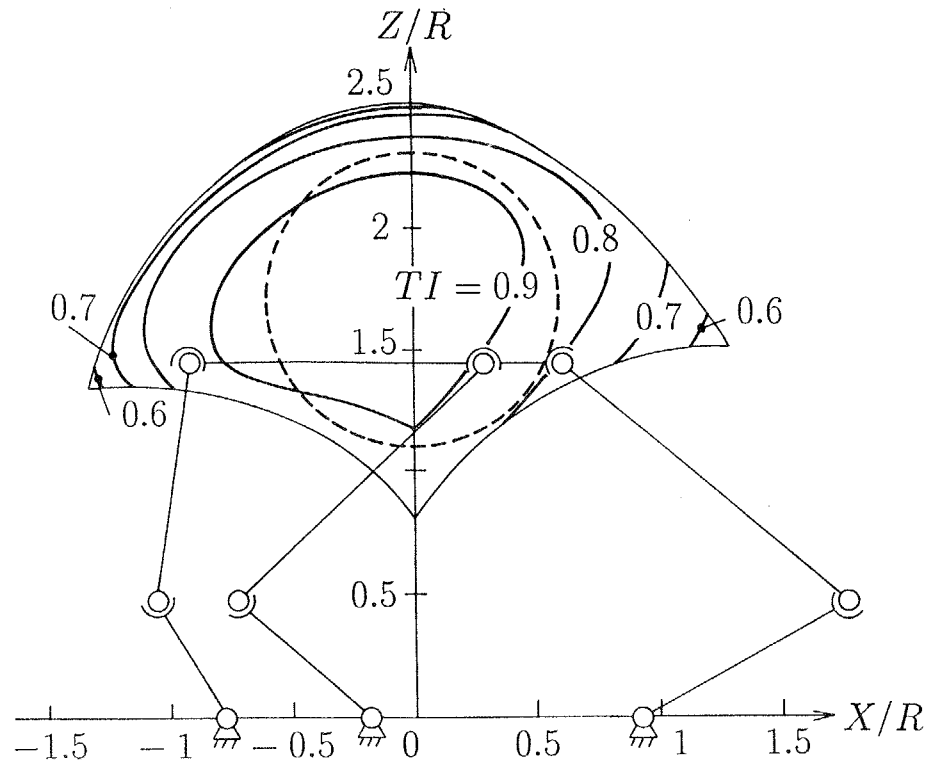
表 5.3 運動伝達性に優れた機構 (2)

条件 (C) に対する結果

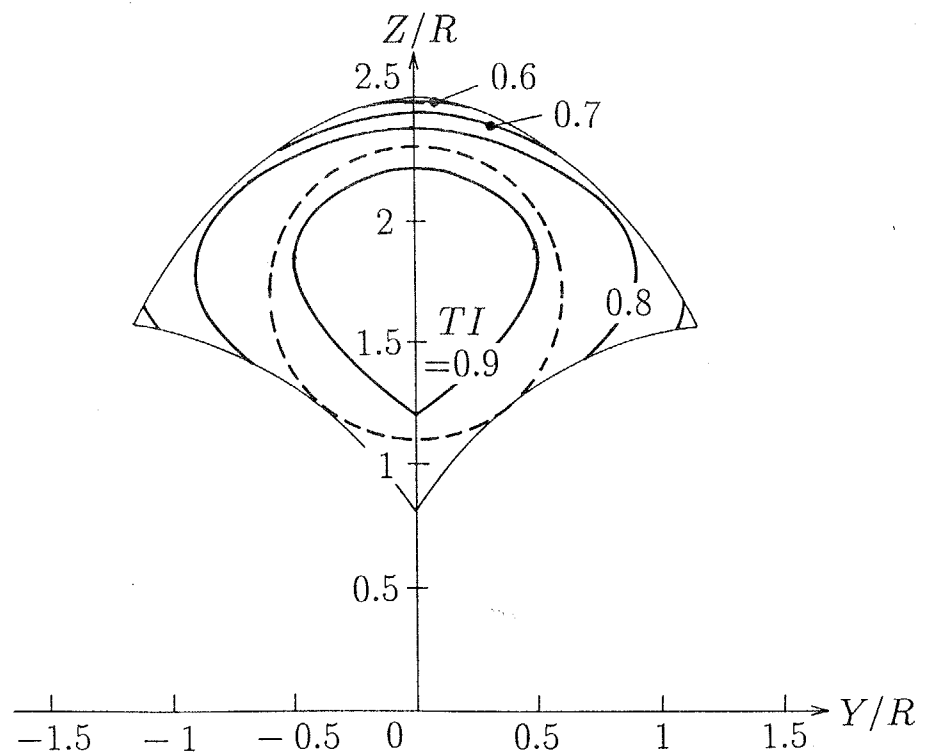
No.	$(\overline{p}_1, \overline{p}_2, \overline{p}_3, \overline{p}_5, \overline{p}_6)$	$TI_{\min}$
1	(0.4999, 0.6218, 0.6678, 0.2571, 0.1412)	0.7963
2	(0.5411, 0.7856, 0.5815, 0.2567, 0.1248)	0.7571
3	(0.5774, 0.7191, 0.6230, 0.2200, 0.2605)	0.7470
4	(0.5883, 0.6482, 0.6463, 0.2049, 0.2954)	0.7269
5	(0.2319, 0.3573, 0.5872, 0.3500, 0.1549)	0.6863
6	(0.5316, 0.7600, 0.5796, 0.2228, 0.3996)	0.6393
7	(0.1163, 0.2145, 0.4895, 0.3990, 0.1443)	0.6363
8	(0.6081, 0.6933, 0.5956, 0.1975, 0.4117)	0.6353
9	(0.5715, 0.7651, 0.5210, 0.2317, 0.1084)	0.6319
10	(0.1540, 0.2539, 0.5012, 0.3804, 0.1275)	0.6295

条件 (D) に対する結果

No.	$(\overline{p}_1, \overline{p}_2, \overline{p}_3, \overline{p}_4, \overline{p}_5, \overline{p}_6)$	$TI_{\min}$
1	(0.5952, 0.3287, 0.5556, 0.8320, 0.3008, 0.1304)	0.8061
2	(0.5915, 0.7230, 0.5981, 0.9178, 0.2503, 0.1355)	0.8015
3	(0.6369, 0.5729, 0.6593, 0.8521, 0.2201, 0.1415)	0.7478
4	(0.5787, 0.7311, 0.5226, 0.9854, 0.2571, 0.1071)	0.7452
5	(0.5414, 0.6207, 0.5466, 0.9063, 0.2773, 0.1090)	0.7420
6	(0.4757, 0.6330, 0.6318, 0.9054, 0.2496, 0.1079)	0.7416
7	(0.5685, 0.6224, 0.4794, 0.9597, 0.2821, 0.1145)	0.7387
8	(0.5607, 0.6699, 0.5688, 0.9401, 0.2463, 0.1563)	0.7345
9	(0.2493, 0.4558, 0.6548, 0.9681, 0.3302, 0.1300)	0.7298
10	(0.5598, 0.6565, 0.6116, 0.8027, 0.2492, 0.1213)	0.7276



(a) $X-Z$ 平面内の分布



(b) $Y-Z$ 平面内の分布

図 5.7 作業領域内の TI の分布

5・6 結言

本章では、パラレルマニピュレータの機構設計を大きく二つの段階に分けて考え、その第二段階における多方面からの詳細評価・検討の対象となる機構定数領域（独立峰領域）を設計の第一段階において機構の一つの評価指数に基づいて抽出するために、モンテカルロ法に基づく手法を提案するとともに、その手法を具体的に6自由度空間パラレルマニピュレータの運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出に適用し、運動伝達性に優れた6自由度空間機構の総合を行った。得られた結果を要約すれば次の通りである。

(1) 乱数によって生成した機構に対する解析結果をもとにして、機構の評価指数に優れた機構定数領域を抽出する手法をモンテカルロ法に基づき提案した。

(2) (1) 項で提案した手法を一形式の6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出に適用し、従来の手法と比較した結果、本手法の有用性が確認された。

(3) 6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の一形式をとりあげ、その機構定数のうち固定される機構定数の条件を4通りに変え、提案した手法により運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出を行った。その結果、その条件の違いにより、独立峰の数、独立峰領域の大きさおよび運動伝達性が大きく異なること、また従来設計変数として扱われてこなかった機構定数の一つ、すなわち入力節の回転軸方向がこの形式の運動伝達性に大きく寄与することが明らかとなった。

(4) (3) 項の結果にさらに入力節の可動範囲、隣接する入力節間の干渉および出力節の大きさを考慮し、所要の作業領域において運動伝達性に優れる6自由度空間パラレルマニピュレータ機構を総合することができた。

第6章 6自由度空間パラレルマニピュレータの 試作および駆動実験

6・1 緒言

パラレルマニピュレータにおいては、アクチュエータをすべて静止系に固定することが可能であるから、高精度・高速運動が可能ではあるがその質量が大きいために従来のシリアルマニピュレータへの適用が不向きであったダイレクトドライブ (DD) モータを使用することができ、DD モータを用いた位置決め精度および高速運動性能に優れたパラレルマニピュレータの開発が期待される。一方、産業用ロボットの性能評価項目は JIS B 8432 に定められているが、その内容はポーズ精度、最短位置決め時間等の具体的な次元を有する数値によるものであり、またアデプトモーションというロボットメーカー等で用いられているロボットの高速運動性能を評価するための手法においても決められた変位に要する時間を評価量としており、大きさ、アクチュエータの容量等が異なるロボット間での客観的な性能評価のための指標は確立されていない。

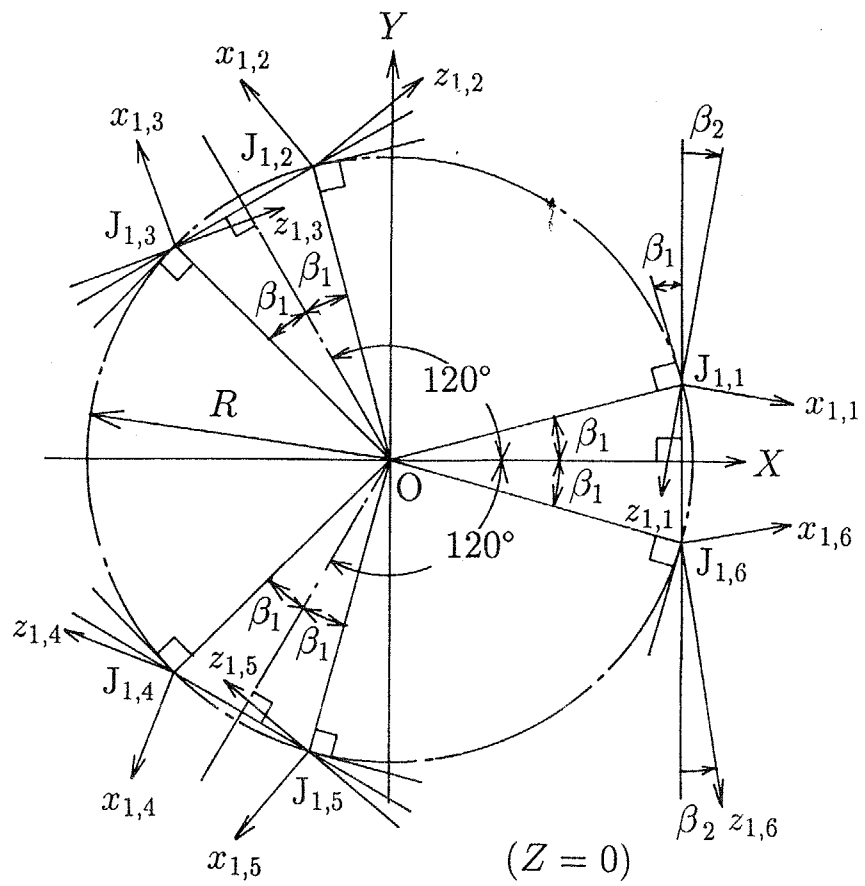
そこで本章では、第5章で得られた総合結果に基づき、DD モータにより駆動される6自由度空間パラレルマニピュレータを実際に試作し、その位置決め精度の測定を行うとともに、位置決め時間および伝達動力に関する評価指数を提案して試作マニピュレータの運動性能の評価を行う。

6・2 試作マニピュレータ

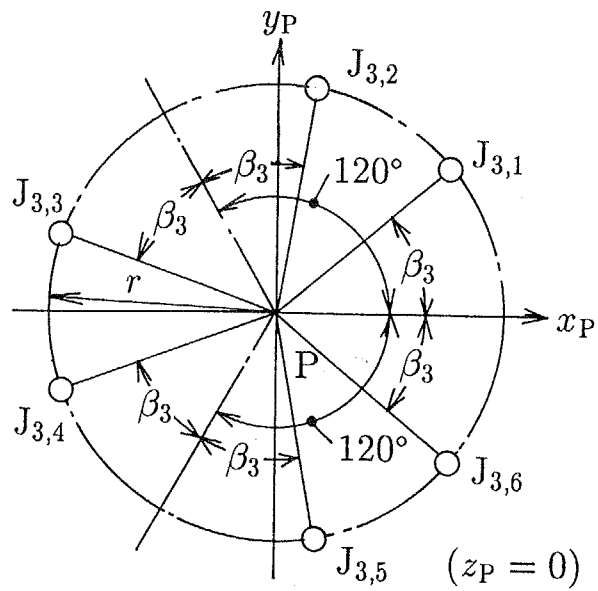
6・2・1 機構系の構成

図 6.1 に示すように静止節と出力節の間に六つの同一の連結連鎖を有し、各連結連鎖が一つの回転対偶と二つの球対偶からなり、静止節上の各回転対偶が駆動対偶である形式の機構のマニピュレータを試作した。本機構における機構定数は、図 6.2 に示す静止回転対偶 $J_{1,i} (i = 1, 2, \dots, 6)$ の位置を決定する配置円半径 R と角 β_1 およびそれらの対偶の XY 平面内の方向を決定する角 β_2 、出力節上の球対偶点 $J_{3,i}$ の位置を決定する配置円半径 r と角 β_3 、入力節長 l_1 および中間節長 l_2 の七つである。試作マニピュレータの機構諸元を表 6.1 に示す。このマニピュレータの節長比および各部の角の諸元は、第5章において総合された機構と同一であり、設計作業領域は半径 144mm の球である。

アクチュエータには回転形ダイレクトドライブ (DD) モータを採用した。その最大トルク、最大回転数、定格回転数、エンコーダの分解能は表 6.2 のとおりである。



(a) 静止節上の対偶配置



(b) 出力節上の対偶配置

図 6.2 静止節上および出力節上の対偶の配置

表 6.1 試作マニピュレータの機構諸元

R	240.0 mm
r	224.0 mm
β_1	19.7°
β_2	10.0°
β_3	49.9°
l_1	236.0 mm
l_2	388.0 mm

表 6.2 DD モータの諸元

Maximum Torque	30 N · m
Maximum Speed	2.4 rps
Rated Speed	1.5 rps
Resolution of Encoder	507904 pulse/rev.

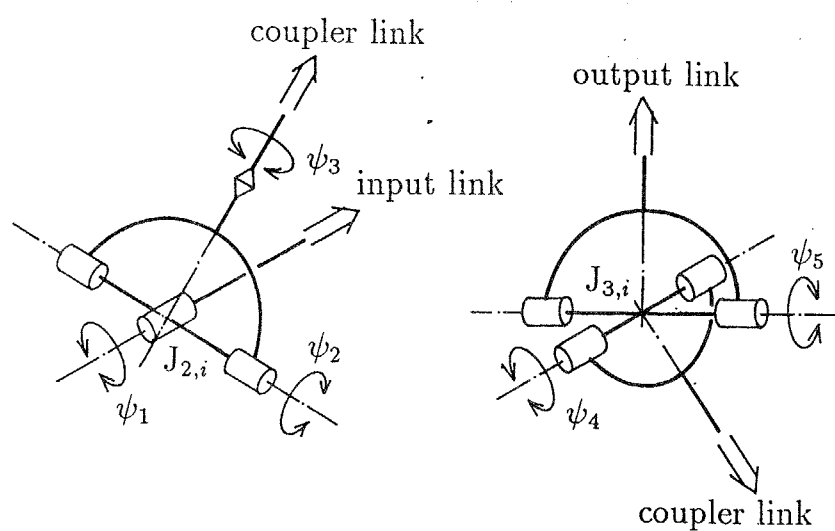


図 6.3 $J_{2,i}$ および $J_{3,i}$ におけるジョイントの構成

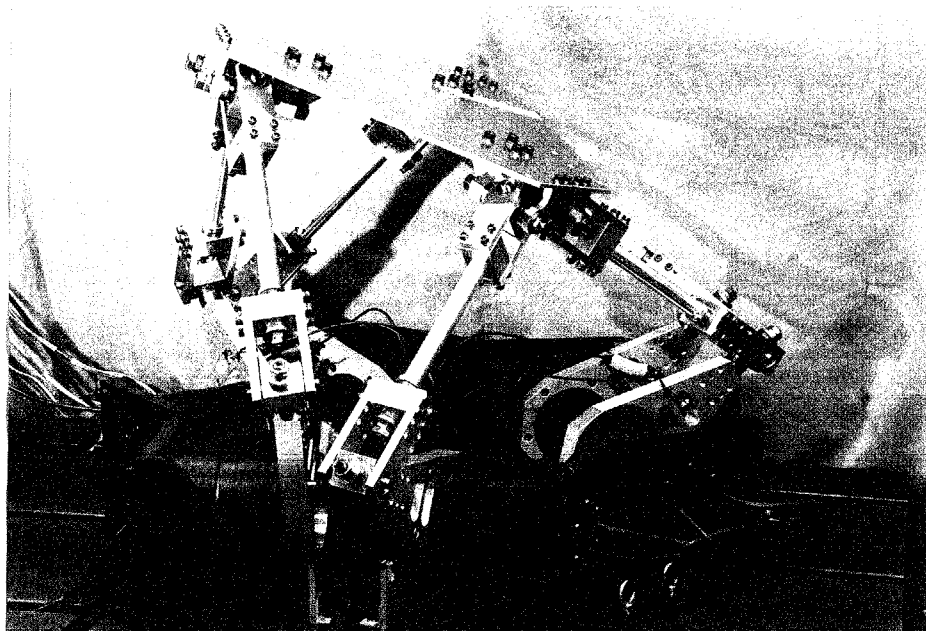


図 6.4 試作マニピュレータの概観

6・2・2 制御系の構成

試作マニピュレータの制御系の構成を図 6.5 に示す. 6 個の DD モータのサーボドライバを一括してソフトウェアデジタルサーボを行うコントローラとして, i486DX(33MHz) を搭載したパーソナルコンピュータを用い, 各サーボドライバとパーソナルコンピュータとは 2 枚の I/O インターフェースボードを介してアドレスおよびデータバスを共有している. そして, 出力トルクの命令や, 現在のカウンタ値等のデータのやりとりはすべてこのバスを介して行われる. また, デジタル制御を行うためにタイマカウンタボードを用い, サンプル周期は DD モータの特性を考慮して 3ms とした. 今回用いた DD モータのサーボドライバはトルク制御形であり, 各モータは図 6.6 に示す目標角変位 θ_d , 目標角速度 $\dot{\theta}_d$ および静的保持トルク τ_s を用いた, 各モータ独立形の PID 制御系により制御される. ここで, 静的保持トルク τ_s は出力節等に働く重力につりあうモータの出力トルクであり, 出力節の各位置および姿勢に対してあらかじめ計算しておく. また, 各モータの目標出力トルク τ_d はサーボドライバ内のトルク出力指令アドレスに出力トルク値として書き込まれた 14 ビットのデータである.

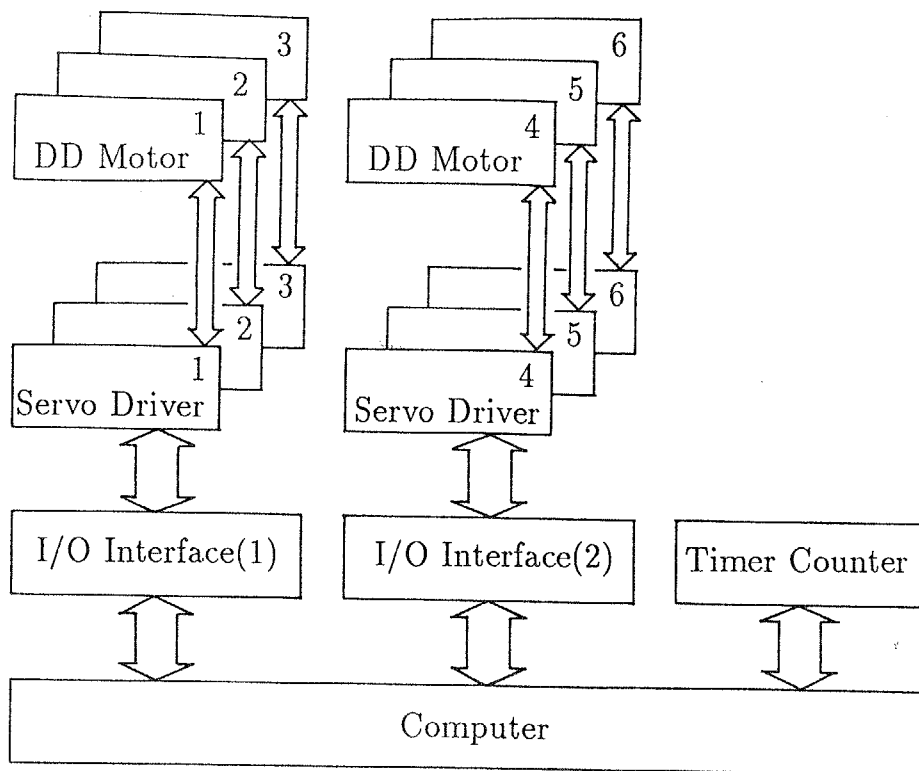


図 6.5 制御系の構成

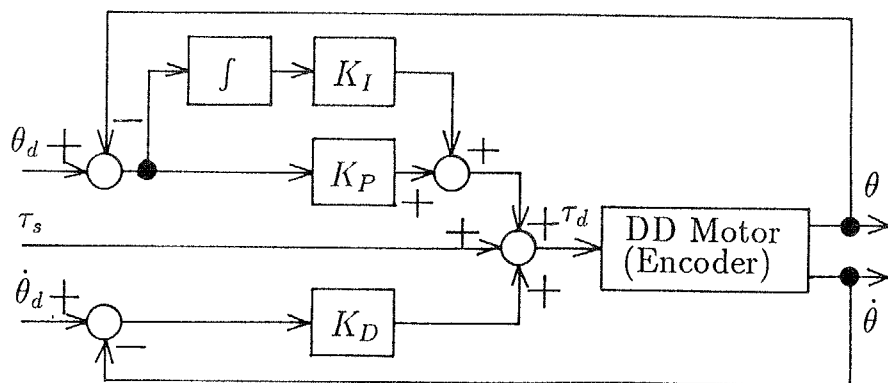


図 6.6 PID 制御系

6・3 位置繰返し精度の評価

6・3・1 実験方法

出力節上の図 6.7 に示す位置に立方体状の鋼製のターゲットを固定し、位置決め時の位置のばらつきをターゲットの X, Y および Z 軸に垂直な面とプローブ測定面をそれと平行に配置した渦電流形変位計により測定する。渦電流形変位計の出力電圧 V_E [V] はプローブとターゲットの距離 d [mm] に比例し、校正の結果をもとにして次式により V_E を d に

変換する.

$$d = 0.318V_E + 1.001 \quad (6.1)$$

なお, d の測定範囲は次のとおりである.

$$0.279 \leq d \leq 2.181[\text{mm}]$$

V_E の測定精度は 1.0×10^{-3} V であり, 式 (6.1) より d の測定精度は 3.18×10^{-4} mm となる.

位置決め指令位置へは位置決め開始位置から, 指令位置および開始位置において速度, 加速度およびジャークがすべて零となる 7 次両停留曲線によって生成される直線軌道に従い位置決めを行う. 7 次両停留曲線の行程 $S = 1$, 目標位置決め時間 $T = 1$ に対する変位曲線 $s(t)$ ($0 \leq t \leq 1, 0 \leq s \leq 1$) は次式で表される.

$$s(t) = 35t^4 - 84t^5 + 70t^6 - 20t^7 \quad (6.2)$$

7 次両停留曲線が規定される目標位置決め時間 $T[s]$ を過ぎた後は, 各 DD モータの目標角変位は指令位置に対応するものに固定される. そして, 各 DD モータのエンコードによる入力角変位の測定値 $\theta_{R,i}$ と指令位置に対応する目標入力角変位 $\theta_{D,i}$ の差の絶対値が DD モータのエンコードの分解能 $\delta\theta_i$ の 2 倍以内に入ったとき, すなわち $i = 1 \sim 6$ のすべてに対して次式が成り立ったとき,

$$|\theta_{R,i} - \theta_{D,i}| \leq 2\delta\theta_i \quad (6.3)$$

位置決めが終了したとして, このときの渦電流形変位計の出力電圧を記録する. 図 6.6 の各ゲインの数値を表 6.3 に示す. 位置決め指令位置における位置繰返し精度 RP は開始位置と指令位置を結ぶ方向について評価を行うこととし, JIS B 8432 に準じて, 次式により計算する.

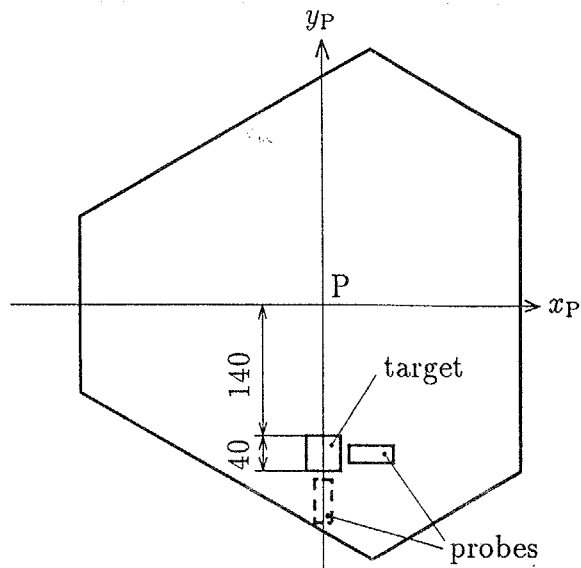
$$RP = \pm 3 \times \sqrt{\sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 / (n-1)} \quad (6.4)$$

ここに,

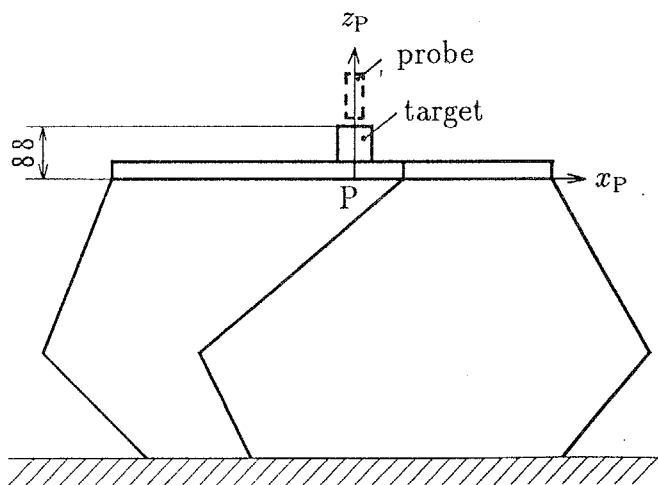
$$\bar{q} = \sum_{j=1}^n q_j / n \quad (6.5)$$

であり, n は繰返し回数, q_j はターゲットとプローブとの j 回目 ($j = 1, 2, \dots, n$) の位置決め時の距離の測定値である.

なお, q_j の測定は図 6.7 に示す位置において行うが, 位置決め指令位置および開始位置は出力節上の点 P の位置で記述する. また, 本実験において指令位置および開始位置における出力節の姿勢はすべて $\varphi_R = \varphi_P = \varphi_Y = 0^\circ$ とする.



(a) $x_P - y_P$ 面内の配置



(b) $x_P - z_P$ 面内の配置

図 6.7 ターゲットの配置

表 6.3 制御系のゲイン

K_P	600	N·m/rad
K_I	6	N·m/rad
K_D	40	N·m·s/rad

6・3・2 実験結果

まず，指令位置と位置決め方向が位置繰返し精度に及ぼす影響を調べた．位置決め指令位置および開始位置の X , Y , Z 座標を表 6.4 に示す．目標位置決め時間はすべて $T = 1s$ とした．渦電流形変位計の出力電圧の一例として，表 6.4 の No.1-3 における出力電圧 $V_E[V]$ の時間変化の一部を図 6.8 に示す．オーバーシュートを起こし，なめらかに指令位置に向かって位置決めを行い，図中の点 A_1 および A_2 の時点で式 (6.3) の位置決め終了条

表 6.4 指令位置と開始位置

No.	Command Position[mm]	Start Position[mm]
1-1	(0,0,400)	(-50,0,400)
1-2		(0,50,400)
1-3		(0,0,350)
2-1	(100,0,400)	(50,0,400)
2-2		(100,50,400)
2-3		(100,0,350)
3-1	(-100,0,400)	(-150,0,400)
3-2		(-100,50,400)
3-3		(-100,0,350)
4-1	(0,100,400)	(-50,100,400)
4-2		(0,150,400)
4-3		(0,100,350)
5-1	(0,-100,400)	(-50,-100,400)
5-2		(0,50,400)
5-3		(0,-100,350)
6-1	(100,100,400)	(50,100,400)
6-2		(100,150,400)
6-3		(100,100,350)
7-1	(100,-100,400)	(50,-100,400)
7-2		(100,-50,400)
7-3		(100,-100,350)
8-1	(-100,100,400)	(-150,100,400)
8-2		(-100,150,400)
8-3		(-100,100,380)
9-1	(-100,-100,400)	(-150,-100,400)
9-2		(-100,-50,400)
9-3		(-100,-100,380)

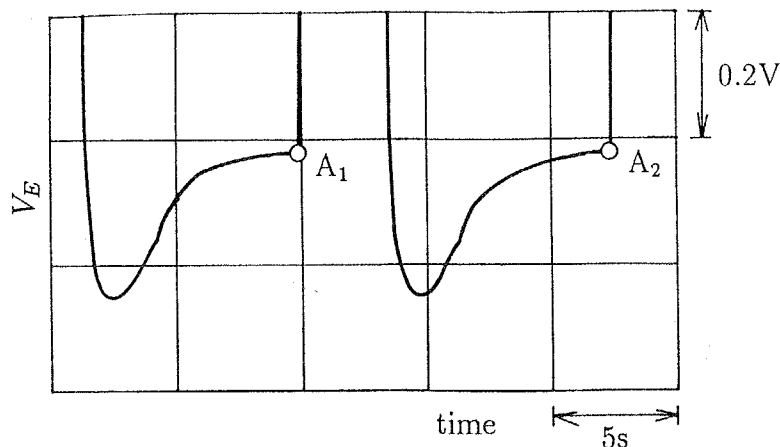


図 6.8 V_E の変化の一例

件が満足され、開始位置にもどって行くことがわかる。このような動作を $n = 20$ 回繰返させた。ここで、JIS B 8432 では $n = 30$ 回以上を推奨しているが、 $n = 20$ としたのは制御プログラムおよび管理できるデータの容量の制限による。実験結果をまとめて表 6.5 に示す。同表において、括弧内の数値は式 (6.3) に対応して理論的に求められる入力角変位誤差のみに起因する最大の位置決め誤差である。同表より、試作マニピュレータにより実現された位置繰返し精度は指令位置および位置決め方向に依存する顕著な傾向は見られず、それらは $\pm 0.0013 \sim \pm 0.0084 [\text{mm}]$ であり、試作マニピュレータの最大負荷質量 (20kg) と同程度の最大負荷質量を有する現状の産業用ロボットの位置繰返し精度は $0.05 \sim 0.1 \text{mm}$ であるから、試作マニピュレータは従来の産業用ロボットに比べて極めて高精度な位置決めを実現していることがわかる。そして、試作マニピュレータは図 5.7 の作業領域と $R = 240.0 \text{mm}$ をもとにすれば各座標軸方向へは 300mm 程度の作業領域を有している。この作業領域の大きさに対する実現された位置繰返し精度は 10^{-5} のオーダーであり、この点からも優れた位置決め精度が試作マニピュレータにより実現されていることがわかる。また、同表より、実現された位置繰返し精度が入力角変位誤差に起因する最大位置決め誤差よりもはるかに優れていることがわかるが、このことは、図 6.8 には 2 回分の位置決め動作に対する V_E の変化の一例を示したが、同図に示すように最終的な位置決めが終了するまでの軌道の再現性がきわめて高いことから推測できる。

表 6.5 実験結果 (1) ($T = 1s$)

No.	$RP[mm]$	No.	$RP[mm]$	No.	$RP[mm]$
1-1	± 0.0041 (0.0306)	1-2	± 0.0021 (0.0204)	1-3	± 0.0036 (0.0325)
2-1	± 0.0013 (0.0294)	2-2	± 0.0048 (0.0211)	2-3	± 0.0052 (0.0309)
3-1	± 0.0027 (0.0306)	3-2	± 0.0030 (0.0205)	3-3	± 0.0027 (0.0329)
4-1	± 0.0032 (0.0309)	4-2	± 0.0039 (0.0199)	4-3	± 0.0049 (0.0317)
5-1	± 0.0084 (0.0309)	5-2	± 0.0050 (0.0199)	5-3	± 0.0014 (0.0317)
6-1	± 0.0015 (0.0296)	6-2	± 0.0026 (0.0207)	6-3	± 0.0030 (0.0301)
7-1	± 0.0040 (0.0296)	7-2	± 0.0041 (0.0207)	7-3	± 0.0025 (0.0301)
8-1	± 0.0035 (0.0309)	8-2	± 0.0054 (0.0200)	8-3	± 0.0028 (0.0328)
9-1	± 0.0058 (0.0309)	9-2	± 0.0019 (0.0200)	9-3	± 0.0032 (0.0328)

(() 内は入力誤差に起因する理論上の最大位置決め誤差である。)

次に、目標位置決め時間 T が繰返し位置決め精度に及ぼす影響を調べるために、表 6.6 に示す 5 通りの指令位置および開始位置の組合せに対して、前半の 20 回 ($n = 20$) は $T_1[s]$ の目標位置決め時間で、後半の 20 回は $T_2[s]$ の目標位置決め時間で連続的に繰返し位置決めを行わせた。 T_1 および T_2 の組合せは表 6.7 に示す 3 通りとした。実験結果として、表 6.6 の各組合せに対して $T_1[s]$ に対する結果のみの位置繰返し精度 $RP_1(n = 20)$ 、 $T_2[s]$ に対する結果のみの位置繰返し精度 $RP_2(n = 20)$ および $T_1[s]$ と $T_2[s]$ に対する結果を総合した位置繰返し精度 $RP_{12}(n = 40)$ を表 6.8 にまとめて示す。同表より、目標位置決め時間が長いほど、これが短い場合よりも位置繰返し精度 RP_1, RP_2 に優れる場合が多いが、いずれの目標位置決め時間においても概ね $\pm 0.01mm$ 以下の優れた位置繰返し精度が実現できていることがわかる。また、二つの目標位置決め時間を混在させた場合の位置繰返し精度 RP_{12} も最悪の場合で $\pm 0.0122mm$ 、平均的には約 $\pm 0.006mm$ という優れた位置繰返し精度が実現できていることがわかる。

表 6.6 指令位置と開始位置

No.	Command Position[mm]	Start Position[mm]
1	(0,0,400)	(0,0,350)
2	(100,0,400)	(100,0,350)
3	(-100,0,400)	(-100,0,350)
4	(0,100,400)	(0,100,350)
5	(0,-100,400)	(0,-100,350)

表 6.7 T_1 および T_2 の組合せ

No.	T_1 [s]	T_2 [s]
a	1.0	0.5
b	1.0	0.75
c	1.0	1.5

表 6.8 実験結果 (2)

No.		RP_1 [mm]	RP_2 [mm]	RP_{12} [mm]
1	a	± 0.0019	± 0.0056	± 0.0066
	b	± 0.0022	± 0.0043	± 0.0073
	c	± 0.0034	± 0.0009	± 0.0041
2	a	± 0.0044	± 0.0052	± 0.0122
	b	± 0.0030	± 0.0024	± 0.0039
	c	± 0.0037	± 0.0021	± 0.0044
3	a	± 0.0051	± 0.0029	± 0.0072
	b	± 0.0027	± 0.0020	± 0.0029
	c	± 0.0054	± 0.0040	± 0.0051
4	a	± 0.0011	± 0.0111	± 0.0099
	b	± 0.0017	± 0.0022	± 0.0039
	c	± 0.0034	± 0.0007	± 0.0031
5	a	± 0.0022	± 0.0039	± 0.0055
	b	± 0.0042	± 0.0079	± 0.0077
	c	± 0.0034	± 0.0021	± 0.0035

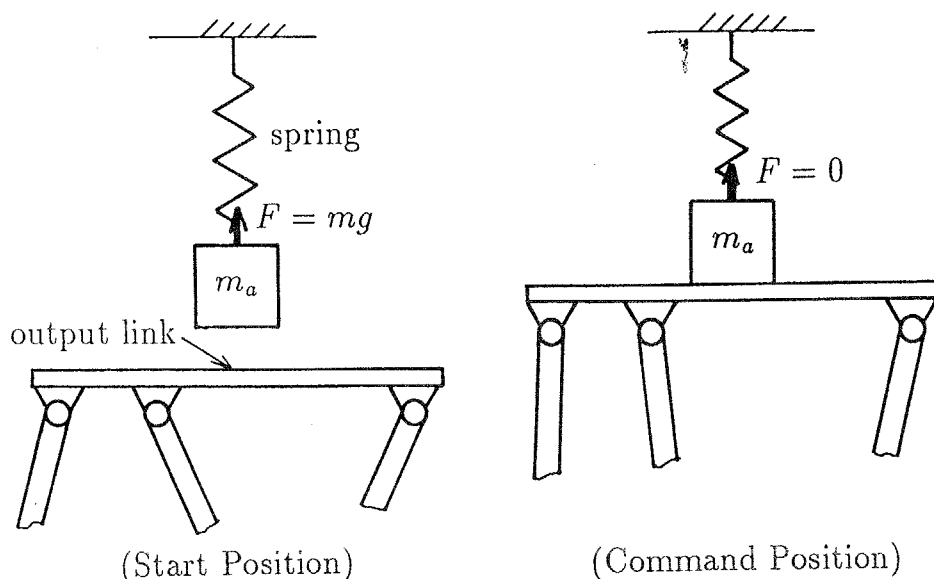


図 6.9 負荷質量と出力節の位置関係

さらに、位置決め動作の途中に出力節の負荷が変化する状況における位置繰返し精度の測定を行った。具体的には、位置決め指令位置が $(0,0,400)[\text{mm}]$ で開始位置が $(0,0,350)[\text{mm}]$ 、目標位置決め時間 $T = 1\text{s}$ の場合について、図 6.9 のように負荷質量 $m_a[\text{kg}]$ をばねで吊った状態にしておき、位置決め開始位置ではこの負荷質量と出力節は接触せず、移動の途中に出力節に接触して負荷が移動とともに増すようにし、指令位置では負荷質量が出力節上に完全に搭載されるようにした。また実験中極力出力節上の中央付近 (点 P の付近) の位置でこの負荷質量と出力節が接触するように配慮した。そして表 6.6 ~ 6.8 に示した実験の場合と同様に、前半の 20 回はこの負荷が作用しない状態で繰返し位置決めを行い、後半の 20 回に上述の負荷が出力節に作用するようにした。実験は $m_a = 2\text{kg}$ と 5kg の 2 通りについて行った。実験結果として、前半の 20 回の負荷が作用しない状況における q_j の平均値をそれぞれについて零としたときの q_j の分布を図 6.10 に示す。同図において、 $j = 1 \sim 20$ および $j = 41 \sim 60$ は負荷が作用しない場合であり、 $j = 21 \sim 40$ は $m_a = 2\text{kg}$ の負荷質量が、 $j = 61 \sim 80$ は $m_a = 5\text{kg}$ の負荷質量が作用した場合の結果である。 $j = 1 \sim 20$, $j = 21 \sim 40$, $j = 41 \sim 60$, $j = 61 \sim 80$ それぞれに対する位置繰返し精度 RP を表 6.9 にまとめて示す。図 6.10 において、 $j = 21 \sim 40$ と $j = 61 \sim 80$ に対す

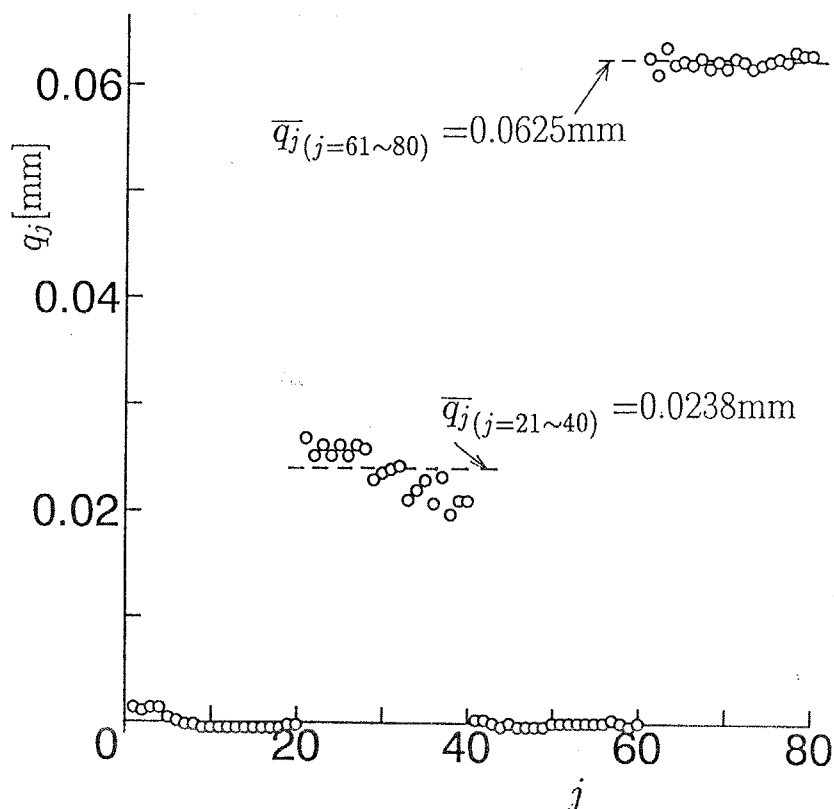


図 6.10 負荷質量が変化する場合の実験結果

表 6.9 実験結果 (3)

j	$RP[\text{mm}]$
1 ~ 20	± 0.0018
21 ~ 40	± 0.0051
41 ~ 60	± 0.0006
61 ~ 80	± 0.0016

る $\bar{q}_j$ の比をとってみると、 $\bar{q}_{j(j=21 \sim 40)} : \bar{q}_{j(j=61 \sim 80)} = 2 : 5.25$ であり、この比は負荷質量 m_a の比 2:5 にかなり近く、これらの $\bar{q}_j$ はマニピュレータの弾性変形によるものがほとんどであることが推察できる。また、表 6.9 よりそれぞれの負荷質量に対する位置繰返し精度は最大で $\pm 0.0051 \text{ mm}$ という優れた結果が得られていることがわかる。したがって、負荷による弾性変形を補償する制御⁽¹¹⁴⁾をパラレルマニピュレータにも適用すれば、負荷が変動する環境においても優れた位置決め精度が実現できると考えられる。

6・4 位置決め時間および伝達動力の評価

6・4・1 実験方法および評価方法

目標位置決め時間 T 、位置決め開始位置および指令位置を与え、出力節の目標軌道をこれらの2点間を直線で結んで生成し、これに対する各モータの目標角変位 $\theta_{D,i}$ の時間変化を決定する。この $\theta_{D,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) に対する追従制御を行い、各サンプリング時刻における各モータの角変位 $\theta_{R,i}$ を測定するとともに、位置決め動作が整定するまでの時間 T_S を求める。ここで、実現位置決め時間 T_S は、 $\theta_{R,i}$ により求められる出力節の最終的な変位量に対して2%の範囲に整定するまでの時間とする。また、 $\theta_{R,i}$ の時間変化より出力節の点Pの軌道を計算し、これを $[X_{P,R}, Y_{P,R}, Z_{P,R}]$ と表す。

ところで、試作マニピュレータの各モータの最大動力 $P_{M,\max}$ は表6.2に示した最大トルクと最大回転数より、 $P_{M,\max} = 452\text{W}$ と計算される。したがって、6個のモータを合わせるとこのマニピュレータの入力最大動力は $P_{I,\max} = 6 \times P_{M,\max} = 2712\text{W}$ となる。出力節が並進運動を行う場合に、出力節の質量(負荷を含む)を $m_o[\text{kg}]$ 、目標軌道に対する速度を v_o 、加速度を a_o 、重力加速度を g で表せば、この運動に必要な動力 $P_T[\text{W}]$ は次式で求められる。

$$P_T = m_o v_o \cdot (a_o + g) \quad (6.6)$$

位置決め開始位置と指令位置、目標軌道の関数形(式(6.2)に示すような $S = T = 1$ に対する変位の時間関数)および出力節の質量が与えられるとき、 P_T の最大値 $P_{T,\max}$ は目標位置決め時間 T により変化する。 $P_{T,\max} = P_{I,\max}$ となる目標位置決め時間は $P_{I,\max}$ なる動力によって実現し得る最小の位置決め時間であるから、これを $T_{\min}$ と表す。ここで、実現位置決め時間 T_S が最小となる軌道および制御系の最適設計を行い、 T_S を理論的に求められる $T_{\min}$ と比較することにより、マニピュレータが達成した位置決め時間 T_S をマニピュレータの最大入力動力を基準として客観的に評価することができる。

そこで、次式の κ_T により位置決め時間の評価を行う。

$$\kappa_T = T_{\min}/T_S \quad (6.7)$$

一方、マニピュレータ内に搭載されているモータの発生動力は出力節に伝達される有効な出力動力として使われる他に中間節等の運動にも消費される。また、モータの容量や減速機の減速比の選定が不適切な場合にはモータはその最大能力を発揮できない。ここで実際に出力節に伝達された動力 P_E を測定し、これを最大入力動力と比較すれば、モー

タの動力をマニピュレータが有効に利用し得ているかを知ることができると考えられる。軌道制御を行っている間中モータが発生し得る最大動力を最大限に利用することは困難であるから、軌道制御を行っている間の P_E の最大値 $P_{E,\max}$ を $P_{I,\max}$ と比較することによりマニピュレータの伝達動力の評価を行うことにする。

そこで、 P_E の最大値を $P_{E,\max}$ と表し、次式の κ_P により伝達動力の評価を行う。

$$\kappa_P = P_{E,\max} / P_{I,\max} \quad (6.8)$$

従来、マニピュレータの高速運動性能を実験的に評価するためにアデプトモーションが用いられることがある。これは、ロボットメーカのアデプト社が定めたものであり、横 300mm、高さ 25mm の制限を満たす往復運動に要する時間で評価を行うものである。内山ら⁽⁹⁸⁾はこのアデプトモーションにより、開発したマニピュレータの高速運動性能を評価している。しかし、この評価方法は時間を評価量としているため、大きさが異なるマニピュレータ間での評価に用いることは困難である。これに対し、式 (6.7) および (6.8) で定められる評価量は無次元量であるから、機構の形式、寸法およびアクチュエータが異なるマニピュレータ間の評価に幅広く適用することができる。

なお、 κ_T および κ_P の数値に対応するアデプトモーションに要する時間 $T_{AM}[s]$ は次のように求められる。アデプトモーションが静止座標系における XZ 平面内で行われると仮定し (Z 軸の正方向を鉛直上向きとする)、時刻 t における出力点の変位、速度、加速度をそれぞれ $[X_P(t), Z_P(t)], [\dot{X}_P(t), \dot{Z}_P(t)], [\ddot{X}_P(t), \ddot{Z}_P(t)]$ で表す。このとき、重力加速度の大きさを $g = 9.8\text{m/s}^2$ で表し、

$$[\dot{X}_P(t)\ddot{X}_P(t) + \dot{Z}_P(t)\{\ddot{Z}_P(t) + g\}]_{\max} m_o = P_{I,\max} \quad (6.9)$$

を満たす目標位置決め時間 T を $T_{AM,\min}$ で表せば、 T_{AM} は κ_T を用いて

$$T_{AM} = 2T_{AM,\min} / \kappa_T \quad (6.10)$$

によって求められる。一方、

$$[\dot{X}_P(t)\ddot{X}_P(t) + \dot{Z}_P(t)\{\ddot{Z}_P(t) + g\}]_{\max} m_o = \kappa_P P_{I,\max} \quad (6.11)$$

を満たす目標位置決め時間 T は $T_{AM}/2$ である。

6・4・2 実験結果

表 6.10 に示す 3 通りの位置決め開始位置、指令位置および目標位置決め時間 T のそれぞれに対して、出力節上に 0, 5, 10kg の負荷質量 m_a を載せた場合について実験を行った。

ここで、出力節の質量は10kgであるから式(6.6)における m_o は $m_o = 10 + m_a[\text{kg}]$ となる。また、目標軌道は6・3節と同様に式(6.2)で表される7次両停留曲線により与えた。各実験に対する $T_{\min}$ の計算値を表6.11に示す。

実験結果の一例として、表6.10のNo.3の $m_o = 10\text{kg}$ の場合の $Z_{P,R}$ の時間変化を図6.11に示す。同図の場合において、実現位置決め時間 $T_S = 0.153\text{s}$ 、 $P_{E,\max} = 889\text{W}$ である。実験結果をまとめて表6.12に示す。同表より、変位量が大きくなる、つまり高速運動になるにしたいが、位置決め時間の評価指数 κ_T および伝達動力の評価指数 κ_P の数值は大きくなる傾向があることがわかる。また、これらの数值はそれぞれ最大で、 $\kappa_T = 0.667$ 、 $\kappa_P = 0.431$ である。式(6.9)～(6.11)を用いてこれらの κ_T 、 κ_P の最大値によりアデプトモーションに要する時間を推定すれば、それぞれ $m_o = 10\text{kg}$ に対して $T_{AM} = 0.462\text{s}$ 、 0.408s となり、これらの数值は従来の高速パラレルロボット HEXA⁽⁹⁸⁾が達成した $T_{AM} = 0.465\text{s}$ に匹敵し、試作マニピュレータは優れた高速位置決め性能を有していると言える。また、HEXAの出力節の質量は負荷も含めて $m_o = 0.390\text{kg}$ であり、また用いられているモータの最大トルクは本試作マニピュレータにおいて用いたものの2分の1であり、その他の速度等の諸特性値は同一のものであることを考慮すれば、本試作マニピュレータはHEXAよりも優れた動力伝達特性を有していると言える。

表 6.10 開始位置，指令位置および目標位置決め時間

No.	Start Position[mm]	Command Position[mm]	Positioning Time[s]
1	(0, 0, 375)	(0, 0, 425)	0.190
2	(0, 0, 350)	(0, 0, 450)	0.190
3	(0, 0, 325)	(0, 0, 475)	0.190

表 6.11 $T_{\min}$ の計算値

No.	m_o [kg]	$T_{\min}$		
		10	15	20
1		0.047	0.055	0.060
2		0.076	0.087	0.097
3		0.099	0.115	0.128

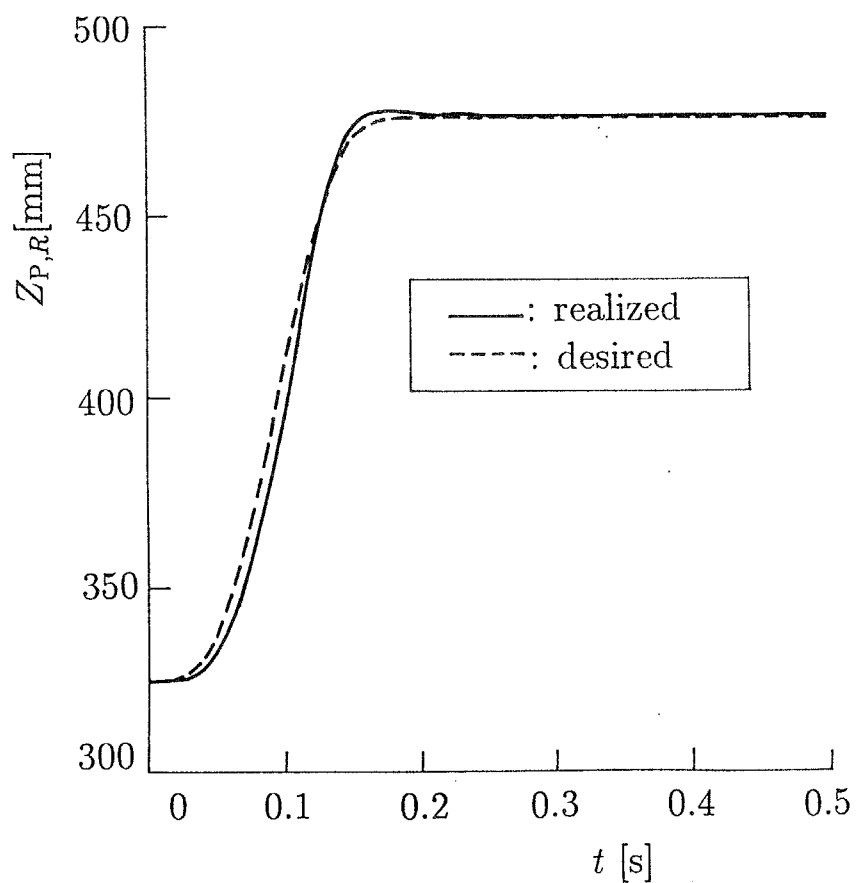


図 6.11 $Z_{P,R}$ の時間変化の例

表 6.12 実験結果 (4)

(a) $T_S[s]$

$m_o[kg]$ No.	10	15	20
1	0.150	0.192	0.204
2	0.260	0.240	0.213
3	0.153	0.267	0.192

(b) $P_{E,max}[W]$

$m_o[kg]$ No.	10	15	20
1	99	136	264
2	617	712	755
3	889	1170	831

(c) κ_T

$m_o[kg]$ No.	10	15	20
1	0.313	0.286	0.294
2	0.292	0.363	0.455
3	0.647	0.431	0.667

(d) κ_P

$m_o[kg]$ No.	10	15	20
1	0.037	0.050	0.097
2	0.228	0.263	0.278
3	0.328	0.431	0.306

6・5 結言

本章では、前章の総合結果に基づき、ダイレクトドライブモータにより駆動される6自由度空間パラレルマニピュレータを実際に試作し、その位置決め精度、位置決め時間および伝達動力について実験的検討を加えた。得られた結果を要約すれば次の通りである。

(1) 試作マニピュレータの位置繰返し精度について、位置決め指令位置、位置決め方向、目標位置決め時間および負荷質量を種々に変え、実験的に調べた。その結果、指令位置、位置決め方向、目標位置決め時間および負荷質量を変化させても作業領域の 10^5 分の1のオーダーの、そして現在の産業用ロボットのなかの試作マニピュレータと同程度の最大負荷質量を有するものの10分の1以下の位置繰返し精度が実現された。また、負荷質量が変動する場合においても、負荷によるマニピュレータの弾性変形を補償する制御を行えば、各アクチュエータの独立なフィードバック制御のみにより優れた位置決め精度が実現できると考えられる。

(2) 位置決め時間の評価指数として、アクチュエータの最大動力の総和に等しい動力により理論上実現し得る位置決め時間の最小値と実現された位置決め時間の比で定義される無次元指数 κ_T を提案した。また、伝達動力の評価指数として、アクチュエータの最大動力の総和と実際に出力節に伝達された動力の比で定義される無次元指数 κ_P を提案した。これらの指数は機構の形式、寸法およびアクチュエータが異なるマニピュレータ間の性能評価に幅広く適用可能である。

(3) 試作マニピュレータについて、位置決め変位量および出力節負荷を種々に変え軌道追従制御実験を行い、提案した位置決め時間および伝達動力の評価指数により検討を加えた結果、試作マニピュレータは高速・高負荷時においてその位置決め時間および伝達動力に優れた性能が発揮されることが明らかになった。また、得られた結果をもとにして従来のロボットの高速運動性能の評価方法であるアデプトモーションに要する時間を試作マニピュレータについて推定して検討を加えた結果、試作マニピュレータはアデプトモーションの観点からも優れた運動性能を有することが確認された。

(4) (1)～(3)の結果より、運動伝達指数を設計時の評価指数とすることによって高精度・高速・高負荷作業に適した6自由度空間パラレルマニピュレータが実現できた。

第7章 結 論

パラレルメカニズムは剛性が高く、可動部が軽量であり、しかも各アクチュエータの発生力の和として大きな出力が得られる。またシリアルメカニズムのように各対偶の角変位誤差や遊びが蓄積されて出力誤差となることはない。¹⁾ 本論文では、パラレルメカニズムのこのような優れた性質を活かしたマニピュレータを開発するために、運動学特性ならびに力学特性を評価して機構総合を行い、理論的ならびに実験的検討を加え、高精度、高速、高負荷作業に適したパラレルマニピュレータ機構の総合を可能とした。

まず、パラレルマニピュレータ機構における運動伝達性の評価を可能とするために、入力節から出力節へ伝達される動力に着目して運動伝達指数を提案し、この指数の有効性を出力節に作用する外力に対する対偶作用力の大きさの観点から考察するとともに、運動伝達性を考慮した作業領域の解析を行って検討を加えた。つぎに、パラレルマニピュレータ機構の特異点を運動伝達指数により定義し、この特異点の高速算出法を提案するとともに代表的な6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の特異点の算出に具体的に適用して検討を加え、また出力変位誤差、発生力の大きさとその等方性の観点から特異点近傍を運動伝達指数の数値により定義して作業領域から特異点近傍を除いた実用作業領域を求めた。また、ロボット機構の形式および寸法に関係なく統一的に適用可能でアクチュエータの出力特性も考慮に入れた機構出力の空間的等方性に関する機構評価量として、動力伝達指数を提案して検討を加えた。そして、機構設計時において大域的な最適機構の総合を可能とするためにモンテカルロ法に基づく手法を提案し、6自由度空間パラレルマニピュレータ機構に適用してその有用性を示すとともに所要の作業領域において運動伝達性に優れる機構の総合を行った。さらに、その総合結果に基づいて、6自由度空間パラレルマニピュレータを実際に試作し、位置繰返し精度、位置決め時間および伝達動力の観点からその運動特性が優れていることを実験的に明らかにした。

本研究で得られた結論を要約すれば次の通りである。

- (1) 出力節を支持する各連結連鎖から出力節へ力のみが作用するパラレルマニピュレータ機構とモーメントが作用する3自由度球面パラレルマニピュレータ機構について、入力節から出力節へ伝達される動力に着目して1自由度機構の圧力角の概念を拡張した運動伝達指数 TI を提案した。これらの指数は、(i) 0～1の間で変化する無次元量である、(ii) 機構の幾何学的条件のみで定まる、(iii) 従来の1自由度機構の圧力角の概念を踏襲している、(iv) パラレルマニピュレータ機構の特異点の評価に適用できる、の機構総合時

および運用時において有用な特徴を有する。

そして、種々の寸法の機構について対偶作用力と TI の関係を調べた結果、 TI の数値が大きければ対偶作用力が小さくなることが確認された。したがって、提案した運動伝達指数を指標とすれば、静力学特性に優れたパラレルマニピュレータ機構の総合が可能である。

(2) パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性を考慮した作業領域の解析を行った結果、出力点が到達可能な作業領域内において運動伝達指数 TI の数値はかなり複雑に分布しており、運動伝達性が良好な領域は形状が複雑であること、またその形状と大きさは機構定数に大きく依存することがわかった。逆運動学解が複数存在する機構においては逆運動学解の選択により運動伝達性に優れた領域の大きさおよび形状が大きく異なるので運動伝達指数によって適切な逆運動学解を選択する必要がある。

(3) パラレルマニピュレータ機構の特異点では運動伝達指数が $TI = 0$ となるが、この特異点を $TI \simeq 0$ かつ出力点はその点を通過する前後においてヤコビ行列式の符号が変化する点として、その具体的な位置を高速に算出する方法を提案した。この方法により大部分の特異点の算出が可能であるが、ごく特殊な場合にこの算出法からもれる特異点があることを回転対偶のみからなる 3 自由度平面パラレルマニピュレータ機構について例示するとともに、この特殊な特異点は提案した算出法により求められる特異点の集合が作る曲線上にあることを示した。このような特異点の集合が作る曲線を特異点曲線と呼ぶことにした。パラレルマニピュレータ機構の作業領域は特異点曲線により複数の領域に分割され、出力点はこれらの分割された領域間を自由に移動できない。さらに、スチュワートプラットフォームの特異点解析を具体的に行い、従来知られていなかった特異点を見出すとともに、既知のものも含めて圧力角および瞬間らせん軸によって特異点において支持不可能となる出力節の負荷を把握することができた。

(4) 出力節の変位誤差、発生力の等方性および駆動力の大きさの観点から運動伝達指数の数値が小さい領域を特異点近傍と定義し、作業領域から特異点近傍を除いた領域を実用作業領域とした。これにより、実際に出力点を移動させてマニピュレーション可能な領域を定量的に定めることができた。具体的に $TI \geq 0.1$ の領域を実用作業領域とすると、その領域は幾何学的に定まる作業領域に比べて著しく狭くなる場合のあることがわかった。

(5) ロボットの機構出力の空間的等方性を評価するために、ロボットの出力節における

異次元の発生力と発生モーメントおよび並進速度と角速度を数値的に等価に扱うことを可能とした上で、アクチュエータから出力節に伝達し得る動力の最大値とアクチュエータの最大発生動力の総和の比で定義される動力伝達指数 η を提案した。この指数は、ロボット機構の形式・寸法、アクチュエータの最大発生力・最大発生速度により決定される0～1の間の数値をとる無次元量であり、1に近いほど出力節における発生力と発生速度の空間的等方性に優れていることを表す。また、パラレルメカニズムとシリアルメカニズムに共通の特異点およびパラレルメカニズムの特異点のいずれの特異点においても $\eta = 0$ となる。

したがって、動力伝達指数 η を指標に選ぶことにより、形式および寸法の異なる機構を対象として、アクチュエータの能力を考慮した最適機構の設計が可能となった。

(6) パラレルマニピュレータ機構の大域的な最適機構を総合することを可能とするために、乱数によって生成した機構に対する解析結果をもとにして機構の評価指数に優れた機構定数領域(目的関数の独立峰領域)を抽出する手法をモンテカルロ法に基づき提案した。提案した手法を一形式の6自由度空間パラレルマニピュレータ機構の運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出に適用して従来の手法と比較した結果、抽出された領域の数および大きさの観点から本手法が機構総合時における運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出に有効であることが確認された。この機構について設計時に固定される機構定数の条件を種々に変え、提案手法により運動伝達性に優れた機構定数領域の抽出を行ったところ、その条件の違いにより運動伝達性、独立峰の数およびその大きさが著しく異なること、また従来設計変数として扱われてこなかった機構定数の一つ、すなわち入力節の回転軸方向がこの形式の機構の運動伝達性に大きく寄与することが明らかとなった。さらに、入力節の可動範囲、隣接する入力節間の干渉および出力節の大きさを考慮に入れて、所要の作業領域において運動伝達性に優れる6自由度空間パラレルマニピュレータ機構を総合することができた。

(7) 総合した機構を用い、ダイレクトドライブモータで駆動される6自由度空間パラレルマニピュレータを実際に試作し、その位置繰返し精度について、位置決め指令位置、位置決め方向、目標位置決め時間、負荷質量を種々に変え、実験的に調べた。その結果、指令位置、位置決め方向、目標位置決め時間および負荷質量を変化させても位置繰返し精度は作業領域の 10^5 分の1のオーダーであった。これは試作マニピュレータと同程度の最大負荷質量を有する現在の産業用ロボットに比べて10分の1以下の精度である。また、位

置決め途中において負荷質量が変動する場合においても、負荷によるマニピュレータの静的弾性変形を補償する制御を行えば、各アクチュエータの独立なフィードバック制御のみにより高精度の位置決めが実現できることがわかった。

(8) 機構の形式、寸法およびアクチュエータの出力特性が異なるマニピュレータ機構間の評価に適用可能な二つの評価指数として、アクチュエータの最大動力の総和に等しい動力により理論上実現し得る位置決め時間の最小値と実際に実現された位置決め時間の比で定義される位置決め時間の評価指数 κ_T およびアクチュエータの最大動力の総和と実際に出力節に伝達された動力の比で定義される伝達動力の評価指数 κ_P を提案した。試作マニピュレータは $\kappa_T = 0.667$ 、 $\kappa_P = 0.431$ を実現しており、きわめて高速性および動力伝達性に優れていると判定された。

上述の結果より、運動学的および力学的特性を評価したパラレルマニピュレータの機構総合が可能となり、高精度・高速・高負荷作業に適した6自由度空間マニピュレータが実現できた。

参考文献

- (1) 特集 “パラレルメカニズム”, 日本ロボット学会誌, 10-6(1992).
- (2) 日本ロボット学会パラレルメカニズム研究専門委員会報告書 (1993).
- (3) D.Stewart : "A Platform with Six Degrees of Freedom", Proc Instn Mech Engrs 1965-1966, 180-1-15, pp.371-386.
- (4) H.Alt : "Der Übertragungswinkel und seine Bedeutung für das Konstruieren Periodischer Getriebe", WERKSTATTECHNIK, 26-4(1932), pp.61-64.
- (5) 舟橋・小川 : "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", 日本機械学会論文集 (第3部), 34-262(1968), pp.1151-1158.
- (6) 渡辺・舟橋 : "ステファンソン形平面6節機構の運動特性 (第2報, 運動伝達性の評価)", 日本機械学会論文集 (C編), 50-452(1984), pp.662-669.
- (7) C.Bagci : "Static Force and Torque Analysis Using 3×3 Screw Matrix, and Transmission Criteria for Space Mechanisms", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 93-1(1971), pp.90-101.
- (8) G.Sutherland and B.Roth : "A Transmission Index for Spatial Mechanisms", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 95-2(1973), pp.589-597.
- (9) 下嶋・小川・川野 : "1ループ空間機構の運動伝達性", 日本機械学会論文集 (第3部), 44-383(1978), pp.2497-2504.
- (10) M.J.Tsai and H.W.Lee : "Generalized Evaluation for the Transmission Performance of Mechanisms", Mech. and Mach. Theory, 29-4(1994), pp.607-618.
- (11) K.H.Hunt : "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms", Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 105(1983), pp.705-712.
- (12) J.P. Merlet : "Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry", The Int. J. of Robotics Research, 8-5(1989), pp.45-56.
- (13) C. Gosselin and J. Angeles : "Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains", IEEE, Trans. on Robotics and Automation, 6-3(1990), pp.281-290.
- (14) 杉本 : "機構の特異点に関する考察", 日本ロボット学会誌, 11-4(1993), pp.550-556.
- (15) K.H.Hunt and E.J.F.Primrose : "Assembly Configurations of Some In-Parallel-Actuated Manipulators", Mech. Mach. Theory, 28-1(1993), pp.31-42.
- (16) J. Sefrioui et C.M.Gosselin : "Etude et Representation des Lieux de Singularite des Manipulateurs Paralleles Spheriques a Trois Degres de Liberté Avec Actionneurs Prismatiques", Mech. Math. Theory, 29-4(1994), pp.559-579.
- (17) H. Asada, I.H. Ro : "A Linkage Design for Direct-Drive Robot Arms", Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 107(1985), pp.536-540.
- (18) 津坂・複泉・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, 5-3(1987), pp.180-186.
- (19) C.Gosselin and J.Angelos : "The Optimum Kinematic Design of a Spherical Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator", Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 111(1989), pp.202-207.
- (20) S.L.Wang : "A Spatial Linkage For a 6-DOF Quasi-Direct-Drive Robot", Int. J. of Robotics and Automation, 6-1(1991), pp.12-18.
- (21) M.Ouerfelli and V.Kumar, "Optimization of a Spherical Five-Bar Parallel Drive Linkage", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 116(1994), pp.166-173.
- (22) 町田・戸田・岩田・飯倉・小松 : "3自由度パラレル機構と宇宙用スマート効果器へ

- の応用”, 日本ロボット学会誌, 12-1(1994), pp.105-111.
- (23) 舟橋・堀江・久保田・武田: ”6 自由度空間パラレルマニプレータの開発”, 日本機械学会論文集 (C 編), 56-523(1990), pp.829-834.
- (24) F. Behi: ”Kinematic Analysis for a Six-Degree-of-Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism”, IEEE J. of Robotics and Automation, 4-5(1988), pp.561-565.
- (25) K.M.Lee and S.Arjunan: ”A Three Degrees-of-Freedom Micromotion In-parallel Actuated Manipulator”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 5-5(1991), pp.634-641.
- (26) E.F.Fichter: ”A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction”, The Int. J. of Robotics Research, 5-2(1986), pp.157-181.
- (27) D.C.H.Yang and Y.Y.Lin: ”Pantograph Mechanism as a Non-Traditional Manipulator Structure”, Mech. and Mach. Theory, 20-2(1985), pp.115-122.
- (28) A.Bajpai and B.Roth: ”Workspace and Mobility of a Closed-Loop Manipulator”, The Int. J. of Robotics Research, 5-2(1986), pp.131-142.
- (29) C.Gosselin and J.Angeles: ”The Optimum Kinematic Design of a Planar Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator”, Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 110(1988), pp.35-41.
- (30) A.Hara and K.Sugimoto: ”Synthesis of Parallel Micromanipulators”, Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 111(1989), pp.34-39.
- (31) 堀江・舟橋・西岡: ”対偶すきまを考慮した 5 節閉ループロボットアームの高精度化に関する研究”, 日本機械学会論文集 (C 編), 55-517(1989), pp.2499-2505.
- (32) C.Gosselin: ”Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators”, Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 112(1990), pp.331-336.
- (33) C.Gosselin and J.Angeles: ”A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators”, Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 113(1991), pp.220-226.
- (34) R.Kurtz and V.Hayward: ”Multi-Goal Optimization of A Parallel Mechanism with Actuator Redundancy”, IEEE Trans.on Robotics and Automtion, 8-5(1992), pp.644-651.
- (35) C.Gosselin and E.Lavoie: ”On the Kinematic Design of Spherical Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators”, The Int. J. of Robotics Research, 12-4(1993), pp.394-402.
- (36) R.S.Stoughton and T.Arai: ”A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity”, IEEE Trans.on Robotics and Automation, 9-2(1993), pp.166-173.
- (37) V.Kumar: ”Characterization of Workspaces of Parallel Manipulators”, Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 114(1992), pp.368-375.
- (38) K.H.Pittens and R.P.Podhorodeski: ”A Family of Stewart Platforms with Optimal Dexterity”, J. of Robotic Systems, 10-4(1993), pp.463-479.
- (39) H.Zhuang and Z.S.Roth: ”Method for Kinematic Calibration of Stewart Platforms”, J. of Robotics Systems, 10-3(1993), pp.391-405.
- (40) 遠山・高野: ”ロボットの運動の高速化に関する研究” 精密機械, 48-5(1982), pp.641-648.
- (41) 中村: ”閉リンクロボットのダイナミクス計算法と駆動冗長性の最適化”, 計測自動制御学会論文集, 25-5(1989), pp.600-607.
- (42) 舟橋・堀江・立矢・谷尾: ”作業領域と静力学特性図に基づくロボット用パンタグラフ機構の総合”, 日本機械学会論文集 (C 編), 55-518(1989), pp.2642-2647.

- (43) 立矢・茶谷・放生・江端：“ロボット用平行クランク形機構の静力学特性”，日本機械学会論文集(C編)，57-543(1991),pp.3698-3703.
- (44) 立矢・江端・茶谷・放生：“ロボット用平行クランク形機構の静力学特性(機構の入出力関係に基づく静力学特性)”，日本機械学会論文集(C編)，58-546(1992),pp.552-557.
- (45) 新井：“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(1992)，pp.526-533.
- (46) 立矢・辻村・江端・茶谷：“ロボット機構の特性評価と比較(第1報，静力学特性に関する評価と比較)”，日本機械学会論文集(C編)，59-559(1993),pp.932-938.
- (47) 小菅・奥田・川俣・福田・小塚・水野：“パラレルリンクマニピュレータの力解析”，日本機械学会論文集(C編)，60-575(1994)，pp.2338-2344.
- (48) 浅田・カマル ヨセフ＝トミー：“無干渉一定慣性アームを有する軽量ダイレクト＝ドライブロボットの機構と制御”，計測自動制御学会論文集，20-12(1984)，pp.1161-1168.
- (49) 立矢：“動力学特性図によるロボット用平行クランク形機構の評価”，日本機械学会論文集(C編)，60-569(1994)，pp.343-349.
- (50) K.J.Waldron and K.H.Hunt: "Series-Parallel Durities in Actively Coordinated Mechanisms", The Int. J. of Robotics Research, 10-5(1991), pp.473-480.
- (51) 赤木・伊東・沢田：“パワーショベル用リンク機構の最適形状設計(ミニマックス型非線形最適化手法の適応)”，日本機械学会論文集(C編)，52-483(1986)，pp.2982-2987.
- (52) 藤田・赤木・三木：“リンク機構設計における多領域最適化システムの研究”，日本機械学会論文集(C編)，60-579(1994)，pp.3670-3677.
- (53) R.E.Garrett and A.S.Hall, Jr.: "Optimal Synthesis of Randomly Generated Linkages", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 90(1968), pp.475-480.
- (54) T.W.Lee and F.Freudenstein: "Heuristic Combinatorial Optimization in the Kinematic Design of Mechanisms (Part 1: Theory)", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 98(1976), pp.1277-1280.
- (55) T.W.Lee and F.Freudenstein: "Heuristic Combinatorial Optimization in the Kinematic Design of Mechanisms (Part 2: Applications)", Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 98(1976), pp.1281-1284.
- (56) 渡辺・舟橋：“モンテカルロ法による平面6節機構の総合”，日本機械学会論文集(C編)，50-454(1984)，pp.1072-1079.
- (57) D.A.Hoeltzel and W.H.Chieng: "Pattern Matching Synthesis as an Automated Approach to Mechanism Design", Trans.ASME, J. of Mechanical Design, 112(1990), pp.190-199.
- (58) 渡辺・清水・佐藤：“最小二乗法曲線適合による平面多節リンク機構の総合”，日本機械学会論文集(C編)，57-543(1991)，pp.3686-3691.
- (59) M.Griffs and J.Duffy: "A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms", J. of Robotic Systems, 6-6(1989)，pp.703-720.
- (60) P.Nanua, K.J.Waldron and V.Murthy: "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform", IEEE, Trans. on Robotics and Automation, 6-4(1990)，pp.438-444.
- (61) C.Innocenti and V.P.Castelli: "Direct Position Analysis of the Stewart Platform Mechanism", Mech. Mach. Theory, 25-6(1990)，pp.611-621.
- (62) C.Zhang and S.M.Song: "Forward Kinematics of a class of parallel(Stewart) platforms with Closed-Form Solutions", J. of Robotic Systems, 9-1(1992)，pp.93-112.
- (63) V.P.Castelli and C.Innocenti: "Forward displacement analysis of parallel mechanisms: closed form solution of PRR-3S and PPR-3D structures", Trans. ASME, J.of

Mechanical Design, 114(1992), pp.68-73.

(64) C.M.Gosselin, J.Sefrioui and M.J.Richard : "Solutions Polynomiales Au Probleme De La Cinematique Directe Des Manipulateurs Paralleles Plans A Trois Degres De Liberte", Mech. and Mach. Theory, 27-2(1992), pp.107-119.

(65) W.Lin, M.Griffs and J.Duffy : "Forward Displacement Analysis of the 4-4 Stewart Platforms", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 114(1992), pp.444-450.

(66) G.R.Pennock and D.J.Kassner : "Kinematic Analysis of a Planar Eight-bar Linkage: Application to a Platform-type Robot", Trans. ASME, J.of Mechanical Design, 114(1992), pp.87-95.

(67) C.Innocenti and V.P.Castelli : "Closed-Form Direct Position Analysis of a 5-5 Parallel Mechanism", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 115(1993), pp.515-521.

(68) M.Raghavan : "The Stewart Platform of General Geometry Has 40 Configurations", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 115(1993), pp.277-282.

(69) C.Innocenti and V.P.Castelli : "Echelon Form Solution of Direct Kinematics for The General Fullu-Parallel Spherical Wrist", Mech. Mach. Theory, 28-4(1993), pp.553-561.

(70) J.P.Merlet : "Forward Kinematics of Nonpolyhedral Parallel Manipulators", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 115(1993), pp.938-940.

(71) K.C.Cheok, J.L.Overholt, and R.R.Beck : "Exact Methods for Determining the Kinematics of a Stewart Platform Using Additional Displacement Sensors", J. of Robotic Systemm, 10-5(1993), pp.689-707.

(72) 小菅・川俣・福田・小塚・水野 : "Stewart Platform 型パラレルリンクマニピュレータの Forward Kinematics 計算アルゴリズム", 日本ロボット学会誌, 11-6(1993), pp.849-855.

(73) N.X.Chen : "Direct Position Analysis of the 4-6 Stewart Platforms", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 116(1994), pp.61-66.

(74) K.Wohlhart : "Displacement Analysis of the General Spherical Stewart Platform", Mech. Mach. Theory, 29-4(1994), pp.581-589.

(75) F.Wen and C.Liang : "Displacement Analysis of the 6-6 Stewart Platform Mechanisms", Mech. Mach. Theory, 29-4(1994), pp.547-557.

(76) J.P.Yin and C.G.Liang : "The Forward Displacement Analysis of a Kind of Special Platform Manipulator Mechanism", Mech. Mach. Theory, 29-1(1994), pp.1-9.

(77) C.Zhang and S.M.Song : "Forward Position Analysis of Nearly General Stewart Platforms", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 116(1994), pp.54-60.

(78) W.Lin, C.D.Crane III and J.Duffy : "Closed-Form Forward Displacement Analysis of the 4-5 In-parallel Platforms", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 116(1994), March, pp.47-53.

(79) B.Dasgupta and T.S.Mruthyunjaya : "A Canonical Formulation of the Direct Position Kinematics Problem for a General 6-6 Stewart Platform", Mech. Mach. Theory, 29-6(1994), pp.819-827.

(80) S.V.Sreenivasan, K.J.Waldron and P.Nanua : "Closed-Form Direct Displacement Analysis of a 6-6 Stewart Platform", Mech. Mach. Theory, 29-6(1994), pp.855-864.

(81) C.M.Gosselin, J.Sefrioui and M.J.Richard : "On the Direct Kinematics of Spherical Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators with a Coplanar Platform", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, 116(1994), pp.583-593.

(82) C.M.Gosselin, J.Sefrioui and M.J.Richard : "On the Direct Kinematics of Spherical Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators of General Architecture", Trans. ASME,

J. of Mechanical Design, 116(1994), pp.594-598.

(83) H.McCallion and P.D.Truong : "The Analysis of A Six-Degree-of-Freedom Workstation For Mechanised Assembly", Proc. of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, 1979, pp.611-616.

(84) 広瀬・梅谷: "歩行機械の脚形態と移動特性", バイオメカニズム 5(1980), pp.242-250.

(85) 広瀬・梅谷: "4足歩行機械の基本的運動調整系の構成と歩行実験", 計測自動制御学会論文集, 16-5(1980), pp.747-753.

(86) I.E.Sutherland and M.K.Ullner: "Footprints in the Asphalt", The Int. J. of Robotics Research, 3-2(1984), pp.29-36.

(87) S.M.Song, K.J.Waldron and G.L.Kinzel: "Computer-aided Geometric Design of Legs for a Walking Vehicle", Mech. Mach. Theory, 20-6(1985), pp.587-596.

(88) S.M.Song and K.J.Waldron: "Geometric Design of a Walking Machine for Optimal Mobility", Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 109(1987), pp.21-28.

(89) J.C.Hudgens and D.Tesar: "A Fully-Parallel Six Degree-of-Freedom Micromanipulator: Kinematic Analysis and Dynamic Model", 1988 ASME Design Technology Conferences(1988), pp.29-37.

(90) N.G.Dagalakis, J.S.Albus, B.L.Wang, J.Unger and J.D.Lee : "Stiffness Study of a Parallel Link Robot Crane for Shipbuilding Applications", Trans. ASME, J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 111(1989), pp.183-193.

(91) D.R.Kerr: "Analysis, Properties, and Design of a Stewart-Platform Transducer", Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 111(1989), pp.25-28.

(92) K.J.Waldron, M.Raghavan and B.Roth: "Kinematics of a Hybrid Series-Parallel Manipulation System", Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 111(1989), pp.211-221.

(93) 広瀬・米田・荒井・井辺: "直動脚4足歩行機械 TITAN VI の開発", 日本ロボット学会誌, 9-4(1991), pp.445-452.

(94) 広瀬・長久保・外山, "四足壁面移動ロボット NINJA-1 の開発", 日本機械学会論文集 (C 編), 57-540(1991), pp.2679-2686.

(95) V.Hayward, C.Nemri, X.Chen and B.Duplat : "Kinematic Decoupling in Mechanisms and Application to A Passive Hand Controller Design", J. of Robotic Systems, 10-5(1993), pp.767-790.

(96) Z.Geng and L.S.Haynes : "Six-Degree-of-Freedom Active Vibration Isolation Using a Stewart Platform Mechanism", J. of Robotic Systems, 10-5(1993), pp.725-744.

(97) M.D.Bryfogle, C.C.Ngugen, S.S.Antrazi and P.C.Chiou : "Kinematics and Control of a Fully Parallel Force-Reflecting Hand Controller for Manipulator Teleoperation", J. of Robotic Systems, 10-5(1993), pp.745-766.

(98) 内山・飯村・多羅尾・ピエロ・外山: "6自由度高速パラレルロボット HEXA の開発", 日本ロボット学会誌, 12-3(1994), pp.451-458.

(99) 本間・新井・安達・中村: "掘削ロボットのための地山モデル", 日本ロボット学会誌, 12-4(1994), pp.621-629.

(100) 田中・瀬口・花原・山口・野田・藤田: "立体トラス形並列アームの実システムとその機構学", 日本機械学会論文集 (C 編), 55-519(1989), pp.2754-2762.

(101) V.Arun, C.F.Reinholts and L.T.Watson: "Application of New Homotopy Continu-

- ation Techniques to Variable Geometry Trusses", Trans. ASME, J.of Mechanical Design, 114(1992), pp.422-427.
- (102) M.Subramanian and S.N.Kramer: "The Inverse Kinematic Solution of the Tetrahedron Based Variable-Geometry Truss Manipulator", Trans. ASME, J.of Mechanical Design, 114(1992), pp.433-437.
- (103) B.Padmanabhar, V.Arun and C.F.Reinholts: "Closed-Form Inverse Kinematic Analysis of Variable Geometry Truss Manipulators", Trans. ASME, J.of Mechanical Design, 114(1992), pp.438-443.
- (104) 吉川: "ロボットアームの可操作度", 日本ロボット学会誌, 2-1(1984), pp.63-67.
- (105) M.J.Tsai and Y.H.Chiou: "Manipulability of Manipulators", Mech. Mach. Theory, 25-5(1990), pp.575-585.
- (106) 内山・清水・箱守: "ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価", 計測自動制御学会論文集, 21-2(1985), pp.190-196.
- (107) J.K.Salisbury and J.J.Craig: "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues", Int. J. of Robotics Research, 1-1(1982), pp.4-17.
- (108) 橋本: "マニピュレータの調和平均型可操作性指標", 計測自動制御学会論文集, 21-12(1985), pp.1351-1353.
- (109) M.Y.Lee, A.G.Erdman and Y.Gutman: "Kinematic / Kinetic Performance Analysis and Synthesis Measures of Multi-dof Mechanisms", Mech. Mach. Theory, 28-5(1993), pp.651-670.
- (110) F.Pierrot, M.Uchiyama, P.Dauchez and A.Fournier: "A New Design of a 6-DOF Parallel Robot", J. of Robotics and Mechatronics, 2-4(1990), pp.92-99.
- (111) K.Hain: "Applied Kinematics", McGraw Hill(1967).
- (112) 内山: "人工の手の運動制御に関する研究(第1報, 特異点を考慮した協調運動の計算)", 日本機械学会論文集(C編), 45-391(1979), pp.314-321.
- (113) 沖野・佐々木: "モンテカルロ積分を利用した多峰性関数の各峰分離 - 多峰性極値探索問題の一解法 -", 計測自動制御学会論文集, 8-6(1972), pp.676-683.
- (114) 姜・内山: "フレキシブルロボットアームの可補償性", 日本ロボット学会誌, 6-5(1988), pp.416-423.

謝辞

本研究を遂行するにあたりまして終始ご指導下さるとともに、私が昭和61年4月に卒業研究生として研究室に配属されて以来ご指導下さいました東京工業大学工学部機械科学科教授 舟橋宏明先生に感謝の意を表します。

また、折にふれご指導下さるとともに本論文をまとめるにあたりご指導、ご助言下さいました東京工業大学工学部機械科学科教授 下嶋浩先生に感謝の意を表します。

さらに、本論文をまとめるにあたりご指導、ご助言下さいました東京工業大学工学部機械科学科教授 長松昭男先生、同学科教授 小野京右先生、機械宇宙学科教授 廣瀬茂男先生に感謝の意を表します。

東京工業大学工学部機械科学科非常勤講師 横山良明先生、精密工学研究所助教授 堀江三喜男先生、機械知能システム学科助教授 岩附信行先生には私が研究室に配属されて以来ご指導、ご助言を頂きました。また、東京工業大学工学部機械科学科 塚本美弥子技官には研究環境の整備にご助力頂きました。皆様に感謝の意を表します。

そして、本研究を遂行するにあたり共同研究者として在学中ご協力頂いた、小野聡君、平原隆史君、市丸寛展君、佐々木康貴君、岡野孝司君、中嶋一貴君に感謝の意を表します。

また、研究活動においていろいろとお世話になりました東京工業大学工学部機械工学科機械要素講座および機械科学科機能システム学講座の先輩、同輩、後輩の皆様ならびに東京工業大学内外の諸氏に感謝の意を表します。

平成7年12月
武田行生