OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	知的適応トラスの機構と動作
Author(s)	花原, 和之
Citation	大阪大学, 1993, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3065939
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

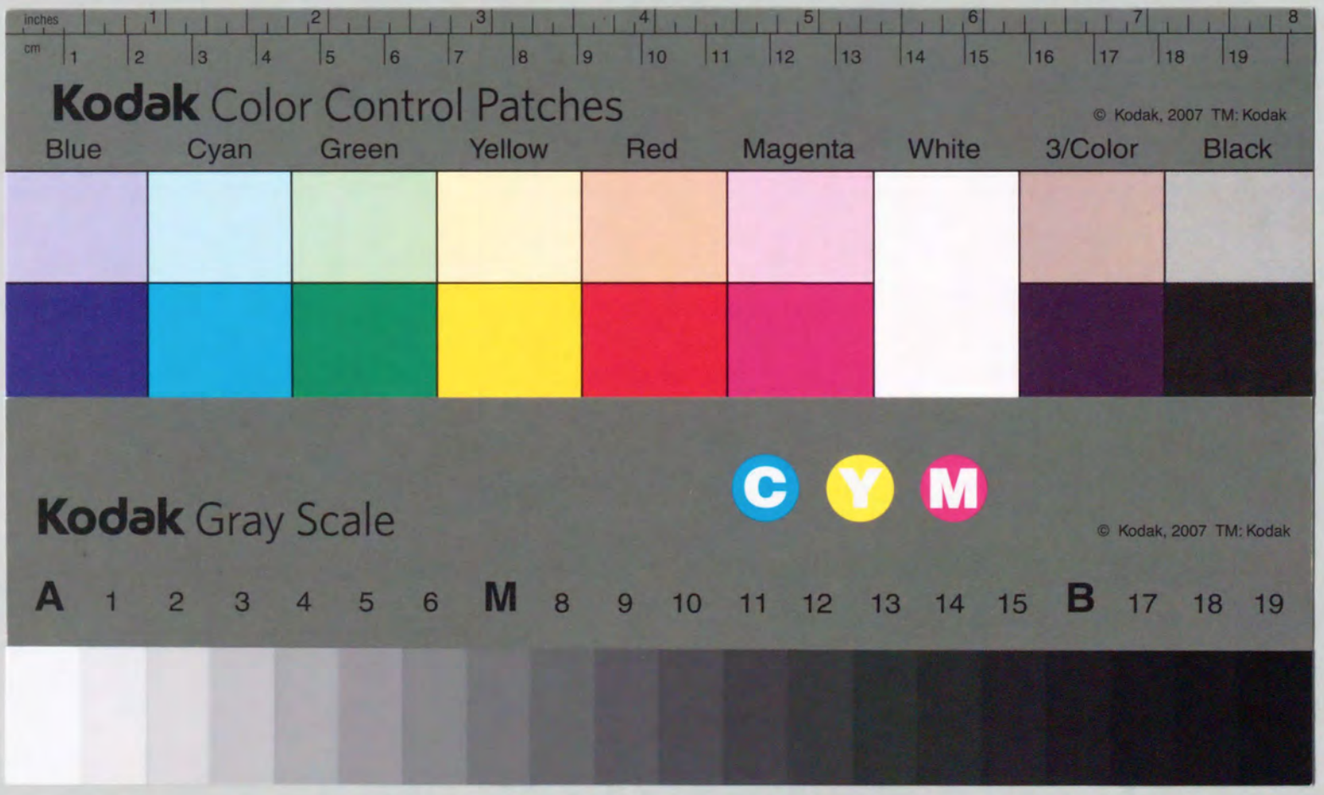
https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

知的適応トラスの機構と動作

平成5年1月

花原和之



知的適応トラスの機構と動作

平成５年１月

花 原 和 之

目次

第1章 緒論 1

1.1 やわらかな機械と適応性 1

1.2 知的適応トラス 4

1.3 適応トラスの機構と動作の実現 7

1.4 本論文の構成 8

第2章 適応トラスの機構学 11

2.1 はじめに 11

2.2 概念モデルとその機構学 12

2.2.1 適応トラスの構成 12

2.2.2 機構運動の記述 13

2.3 節点オフセットを考慮した実モデル 15

2.3.1 概念モデルから実モデルへ 15

2.3.2 機構関係の定式化 18

2.4 作業空間ベクトル 26

2.4.1 適応トラスの作業空間 26

2.4.2 実モデルの機構関係の記述における補助変数の意味 29

2.5 機構運動シミュレーションによる節点オフセットの影響の評価 30

2.6 おわりに 35

第3章 節点オフセットを考慮した動力学 **37**
3.1 はじめに 37
3.2 概念モデルの運動の記述 38
3.2.1 運動を記述する変数 38
3.2.2 エネルギの定式化 39
3.2.3 Lagrange の運動方程式 49
3.3 実モデルへの定式化の拡張 51
3.3.1 運動を記述する変数 51
3.3.2 エネルギの定式化 54
3.3.3 Lagrange の運動方程式の導出 60
3.4 適応トラスの動力学特性の検討 62
3.4.1 動力学シミュレーション 62
3.4.2 固有振動数と振動モード 66
3.4.3 節点オフセットの大きさと動力学特性 68
3.5 おわりに 69

第4章 モジュール形ニューラルネットを用いた動作誘導 **73**
4.1 はじめに 73
4.2 階層形ニューラルネットによる適応トラスの動作誘導 . . 74
4.2.1 階層形ニューラルネットワークと誤差逆伝播学習 75
4.2.2 逆伝播則を用いた動作誘導の基本的な考え方 . . . 79
4.3 ニューラルネットワークのモジュール化構成 85
4.3.1 適応トラスの機構学的構成に基づくネットワークの構成 85
4.3.2 動作評価規範とネットワークの構成 88
4.4 提案した手法に基づく適応トラスの動作 90

4.5 おわりに 93

第5章 動作評価規範の獲得と環境・条件への柔軟な適応 **95**
5.1 はじめに 95
5.2 動作評価規範の獲得 96
5.2.1 動作規範の選定における問題点 96
5.2.2 ニューラルネットワークによる動作評価規範の獲得 98
5.2.3 動作評価規範の獲得におけるネットワークのモジュール化構成 100
5.3 環境・条件の変化への柔軟な適応 104
5.4 動作誘導シミュレーション 112
5.4.1 動作評価規範の獲得 112
5.4.2 環境・条件の変化に適応した動作 117
5.5 おわりに 119

第6章 システムとしての実現に向けて **121**
6.1 はじめに 121
6.2 作業空間における可到達性 122
6.2.1 可到達性の判定 123
6.2.2 制約関数の定式化 126
6.2.3 可到達限の探索例 128
6.3 高多自由度性に着目したアクチュエータのばらつきを許容する適応トラスの動作 131
6.3.1 統計的な視点からのアプローチ 132
6.3.2 巨視的な観点に基づく適応トラスの動作 135
6.3.3 シミュレーションによる検証 137

6.4 機構的に形態が定まらない実モデルのポテンシャル場における安定化形態 143
6.4.1 安定化形態の解析手法 143
6.4.2 形態解析シミュレーション 150
6.5 おわりに 152

第7章 結論 **155**

付録 **159**
A.1 概念モデルの増分形機構関係 159
A.2 実モデルの増分形機構関係 161
A.3 作業空間ベクトルの取り扱い 167
A.4 全体座標系 C から部材座標系 C_{ni} への座標変換 169
A.5 縦部材のたわみとねじれを考慮した機構関係 171
A.5.1 縦部材のたわみ·ねじれの導入による機構関係式の拡張 171
A.5.2 動力学解析に必要な増分関係式の導出 172
A.6 ジョイント回転角の余弦の増分関係 176
A.6.1 可到達範囲の探索に用いる場合 176
A.6.2 安定化形態の解析に用いる場合 179
A.7 ニューラルネットワークを用いた動作誘導における不等式制約の取り扱い 180
A.8 ニューラルネットワークのモジュール化構成の実際 . . . 182
A.9 並列処理による提案した動作誘導手法の実現について . . 184
A.9.1 ニューラルネットワークの並列処理様式 184
A.9.2 モジュール化構成に基づく処理の分割 186

参考文献 **189**

関連論文 **211**

謝辞 **215**

第1章

緒論

1.1 やわらかな機械と適応性

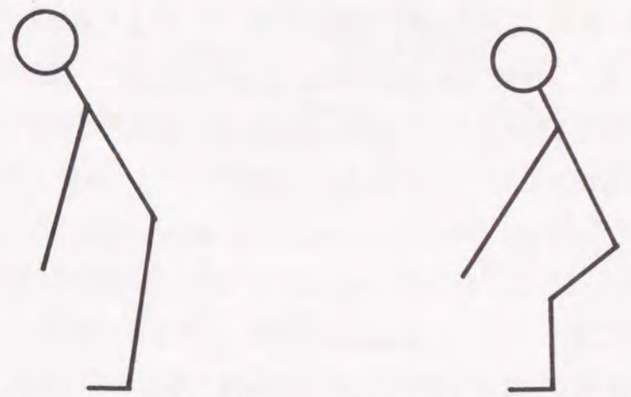
機械はかたく，生き物はやわらかい，と我々は感じている．機械と生き物はよく対比されるが，実際には，機械はさまざまな点で生き物に範を求めており，現在では幾つかの特定の能力に関しては生き物を凌駕する機械さえ実現されている．しかしながら，本来生き物が備えているやわらかさ，しなやかさといった特性については，ほとんどの機械の場合考慮されていない．例えば，コウモリや鳥のつばさのしくみをまねて，飛行機の原形が創り出された．そして，研究が重ねられ，現在では，飛行機はその速さ，可搬重量，航続距離といった点でコウモリや鳥の能力をはるかに越えてしまった．しかし，飛行機が実現できなかった点がある．静かに飛ぶことである[2]．また，ロボットについてはどうであろうか．ロボットはもともと，人間が行っていた作業を機械に行わせるべく考え出され，創り出されたものである[12]．そして，人間が行っていた溶接，組み立てといった作業を人間より速く，正確に，休みなく行うことができるようになった．しかし，これらのロボットは，その能力を発揮するために，障害物などが無く，必要な物が所定の位置に常に存在し，不測の事態などが起こらない「世界」を必要とする．

言うまでもなく，生き物の持つ能力は，基本的にはその生存のためのも

のである．コウモリや鳥は，獲物を捕えるために，あるいは他の動物の獲物とならないために，静かに飛ばなければならない．また，人間は，その目的を達成するために，時には雑然とした，障害物が散在する空間の中で働かなければならない．このように，生き物はさまざまな環境に適応して活動しなければならず，そのためにやわらかさ，言い換えれば柔軟性を必要としてきた．一方，これまで機械に要求されてきたのは速く，正確に目的を達成することであり，環境への適応はあまり重要ではなかった．自動車に対しては道路が，飛行機に対しては飛行場が，そしてロボットに対しては工場が整備され，機械が環境に適応するのではなく，環境が機械に合わせて改変されてきたからである．しかしながら，機械がその活躍の場を広げ，また，人々の日常の生活にまで深くかかわってこようとしている現在[42][90][93]，生き物のような環境への柔軟な適応能力，すなわち，やわらかさ，しなやかさを持った機械が求められている[45]．

生き物の持つやわらかさの本質とは何であろうか．生き物と現在の機械との大きな相違点の一つとして，生き物それ自身を構成している素材の機械的性質を挙げることができる．すなわち，多くの生き物は，柔軟な機械的性質を持つ筋肉や皮膚などの体組織により構成されている．剛性の低い弾力性に富む素材を用いて機械を構成すれば，生き物のやわらかさを実現できるだろうか[46]．フレキシブル·マニピュレータと呼ばれる，柔軟材料で構成されたマニピュレータや，柔軟なアクチュエータを用いたマニピュレータに関する研究がなされている[23][136]．しかし，このようなマニピュレータは，外力に対しての適応性は認められるが，作業条件・環境に対する適応性は，基本的に従来のマニピュレータと同等であり，柔軟材料それ自身が何らかの適応性を持たないかぎり，生き物のような本質的なやわらかさを与えるものではないことがわかる．

本論文においては，生き物の特徴として，多くの可動部分，すなわち機構的自由度を持つことに注目する．例えば，ヘビについて考えてみるならば，その柔軟な動作は，多くの関節を持つことによって実現されている．このことは，硬いユニットを多く結合することによりヘビのような動作を実現するロボットの研究などによっても明らかにされている[35]．実際，ヘビに限らず，生き物は一つの動作を行うために実に多くの自由度を駆使する．例えば，人間はその歩行動作の際に，両足の自由度に加えて，上半身の自由度をも活用してバランスを維持する．これらの多くは，単純化された主目的である歩行動作を達成するためには不可欠な自由度ではなく，冗長な自由度である．しかしながら，このような冗長な自由度は，なめらかで優雅な動作の実現に大きく寄与している．また，作業条件に対する適応性についても，冗長な自由度により実現することが可能である．図1.1に示す，人間が直立姿勢から物を持ち上げる動作を考える．軽いものを持ち上げることは図1.1(a) に示すような姿勢でも行うことができるが，重いものを持ち上げる場合には図1.1(b) のような姿勢をとる必要がある．



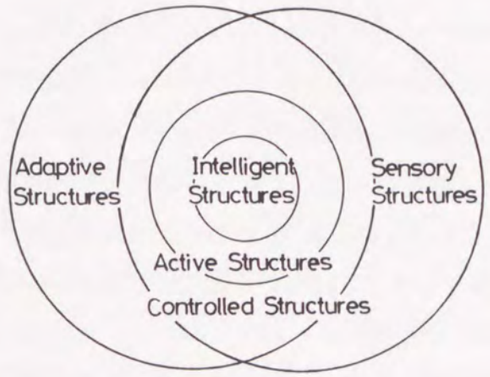
(a) 軽いものを持ち上げる場合　　(b) 重いものを持ち上げる場合

図 1.1: 物を持ち上げる動作における冗長自由度の利用

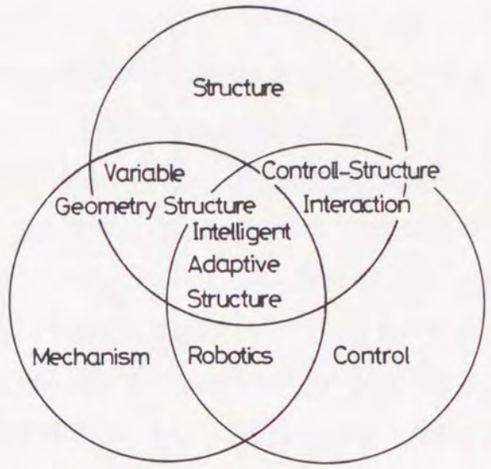
(a) に示す姿勢は動作が単純であり, 重心の移動も小さく, 小さなエネルギで目的の動作を達成することができる. (b) の場合は重心を大きく移動させることにより, バランスを維持しながら重量物を持ち上げることができる. この例では, 両者の違いはひざの部分の自由度だけであるが, 冗長な自由度の利用により作業に適応する様子が示されている. このように, 生き物はその保有する多くの機構的自由度を駆使することにより, 環境に柔軟に適応する特性を発揮している. 本論文では, 機械システムに多くの機構的自由度を付与することにより, 生き物のようなやわらかさ, しなやかさを実現することができると考え, 機構的に非常に多くの自由度を持つことができる機械システムである適応トラスを取り上げ, その機構と動作の実現について議論する.

1.2 知的適応トラス

構造物は固定であるというのがこれまでの一般的な概念であったが, 1980 年代に入り, 宇宙構造物の分野において展開構造物[87][92][94]の考え方が提案された. これは, 運搬に際してはコンパクトに収納し, オペレーションに際して展開するものである. この発展として, 構造物に様々な機能を付加する試みがなされ, 適応構造物, 知的構造物など種々の概念が提出されるに至っている. このような構造物のフレームワークについて, Wada ら[140]は, 知的構造物 (Intelligent Structure), 名取ら[88]は, 知的適応構造物 (Intelligent Adaptive Structure) を核とする整理を行っている. 図 1.2(a) に示すように, Wada らは構造物に対する付加機能として駆動系 (Actuator) あるいは知覚系 (Sensor) を有するものを適応構造物 (Adaptive Structure) あるいは知覚構造物 (Sensory Structure) と定義し, それらの機能の統合の段階により制御構造物 (Controlled Structure), 能動構造物



(a) 知的構造物[140]



(b) 知的適応構造物[88]

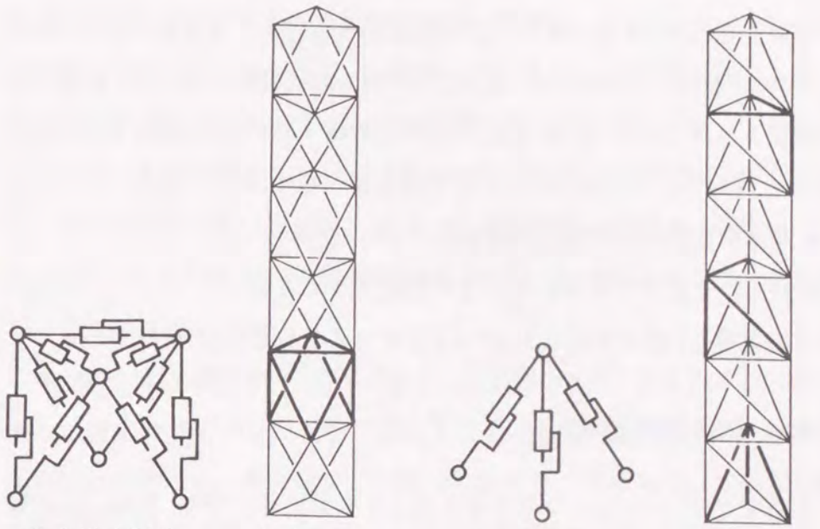
図 1.2: 機能を付加された構造物のフレームワーク

(Active Structure), 知的構造物 (Intelligent Structure) の各概念を定義している. また, 名取らは図 1.2(b) に示すように, 構造 (Structure), 機構 (Mechanism), 制御 (Control) をキーワードとし, それらの結び付きとして可変幾何構造物 (Variable Geometry Structure), ロボット (Robotics), 制御構造相互作用 (Control-Structure Interaction) を定義し, さらにその核として知的適応構造物 (Intelligent Adaptive Structure) の位置づけを行っている. いずれの場合においても, 知的という用語は何らかの制御性との関連において用いられており, いわゆる知能や知性といった高度の概念を直ちに意味するものではないことに留意する必要がある.

本研究では, 図 1.2(b) のフレームワークにもとづき, 知的適応構造物のひとつとして代表的な, トラス構造を基礎とした知的適応トラス (以下, 単に適応トラス) をとりあげる. 適応トラスは, 静定なトラス構造物の部材を可変長アクチュエータに置き換えた機械システム[71]であり, 宇宙用クレーン[14][16][138], 柔軟ロボットアーム[113]などの応用が研究されている. トラス構造を持つことから, 比較的軽量かつ高剛性のメカニズムとなることが期待できるが, 適応トラスの最大の特徴は, メカニズムの機構的静定性に由来する高多自由度の保有である. ほとんどの場合, 適応トラスの持つ機構的自由度の数は, 果たすべき主目的を達成するために必要な自由度の数を大きく上回るため, 適応トラスは高い冗長性を持つ機械システムと言うことができる. これらの冗長な自由度を活用することにより, 適応トラスは, 前節で述べた生き物のようなやわらかさ, すなわち, 作業・環境に対する柔軟な適応性を発揮することが期待できる.

1.3 適応トラスの機構と動作の実現

適応トラスはトラス構造を基本としているが, その形態が変化するため, その実現のためには, 複数の部材を接続する節点部についての考察が必要となる. 複数の部材が節点において回転中心を共有して接続されるのが理想的であるが, そのような機構の実現は非常に困難である. 実際の機構では, 節点部に, 部材を接続するための複数の回転ジョイントが存在することとなり, これらのジョイント回転中心間のオフセット (節点オフセット) の取り扱いを考慮しなければならない. 適応トラスの機構学, 動力学などについての研究[14][16][39][111][128] が報告されているが, このような節点オフセットを取り扱ったものは見当たらず, 節点の不完全性による誤差という形式で取り扱った Ramesh らの報告[103] がなされているにす



(a) VG トラス　(b) ヘリカルマスト

図 1.3: 繰り返し構造を持つ 2 種類の一次元静定トラス

ぎない.

機構的冗長性という点について考えれば, 冗長自由度を持つマニピュレータに関する研究が近年多くなされている[85][112][117][118] が, それらの冗長性は高々数自由度のものであり, 保有する自由度の大部分が冗長自由度となるマニピュレータに関する研究は, 浅野[5], Chirikjian[15], Kokkins[57], Tsutsumi[134]など少数が散見されるにすぎない. 機械システムが多くの機構的冗長自由度を持つならば, それらをどのように活用するかが重要となる. このような冗長自由度の活用は, 動作を評価する何らかの規範にもとづいてなされるのが一般的である. しかしながら, 状況に応じた規範の選択に関する明確な指針や, 数理的に記述することが困難である定性的あるいは感覚的な規範の取り扱いについては, 現在のところほとんど議論されていない.

本研究では, 一次元の繰り返し構造を持つ適応トラスを取り上げ, 適応トラスの機構と動作の実現に関連したこれらの問題を取り扱う. 候補となる静定トラスとしては, 図 1.3に示す可変立体トラス (Variable Geometry Truss: VGT) とヘリカルマストの 2 種類が可能である[72]が,

- 基本構成単位が単純であること
- 異方性を活用した多彩な動作が期待できること

などを考慮し, 図 1.3(b) に示すヘリカルマストを取り扱う.

1.4 本論文の構成

本論文では, ヘリカルマスト形の適応トラスにもとづき, 次のような観点から議論を行う.

機構の実現 (2,3章) ヘリカルマスト形適応トラスの機械的・機構的特性に関する考察.

動作の実現 (4, 5章) 非常に多くの冗長自由度を保有することを活用した, やわらかな機械としての動作の実現手法.

システムとしての実現 (6章) 適応トラスを機械システムとして実現するために必要となる事項に関する考察.

第 2章では, ヘリカルマスト形適応トラスの機構の実現を, 回転ジョイントの自由度の調整による形態の機構的一意性の考慮を含めて取り扱う. 以後の議論に用いる 2 種類のモデル, すなわち, 理想的なトラス構造に基づく概念モデルと, 節点オフセットを考慮した実モデルとを定義し, それらの機構関係式を基本構成単位である四面体構造のトラスモジュールの機構関係式より導く.

第 3章では, 適応トラスの力学的側面に着目する. 2章で述べた概念モデルおよび実モデルに基づく動力学関係式を導き, シミュレーションを通じて適応トラスの動的振る舞いを観察する. 得られた結果を通じて, 動力学的特性に対する節点オフセットの影響を明らかにする.

第 4章では, 階層形のニューラルネットワーク[109]の学習機能と, それに用いられる誤差の最小化機能とに着目した動作誘導手法を提案する. また, 適応トラスの機構学的構成を参照した, ニューラルネットワークのモジュール化構成を示す.

第 5章では, 作業条件・環境に対する適応能力を持つ, やわらかな機械として適応トラスを見た場合に重要となる, 冗長自由度の活用のための動作評価規範について考察する. 4章で提案した手法に基づいて動作評価規範を試行動作を通じて経験的・帰納的に構成する手法を提案し, シミュレーションによりその有効性を検証する. また, 環境・条件の変化に対する適応動作の実現について述べる.

第 6章では, 適応トラスのシステムとしての実現に関連したいくつかの問題を取り扱う. 適応トラスを柔軟ロボットアームあるいは宇宙用クレーンとして適用する際に考慮が必要となる, 作業空間における可到達範囲の探索手法を提案する. また, 機構的に高多自由度システムであることを利用した, 動作制御の統計学的アプローチについても検討を行う. さらに, 特殊な場合として, 機構的に形態が一意に定まらない構造を持つ適応トラスの実モデルのポテンシャル場における安定化形態の解析について述べる.

最後に, 第 7章で本論文の総括を行い, 今後の適応トラスおよびやわらかな機械に関する研究課題とそれらの発展について概観する.

第2章

適応トラスの機構学

2.1 はじめに

適応トラスは, 静定なトラス構造物の部材を可変長アクチュエータに置き換えたメカニズム[71]であり, 概念的には, 部材の集中する節点部の大きさを考慮しない理想的なトラス構造を持つものとしてモデル化することができる[113]. このようなモデル (概念モデル) は, 数理的な取り扱いも単純であることから, 適応トラスの研究に広く用いられている[75][125][128]. しかしながら, 適応トラスをメカニズムとして実現する際には, そのような理想的な節点部をそのまま構成することは不可能であり, 実現可能な機構についての考察が必要となる.

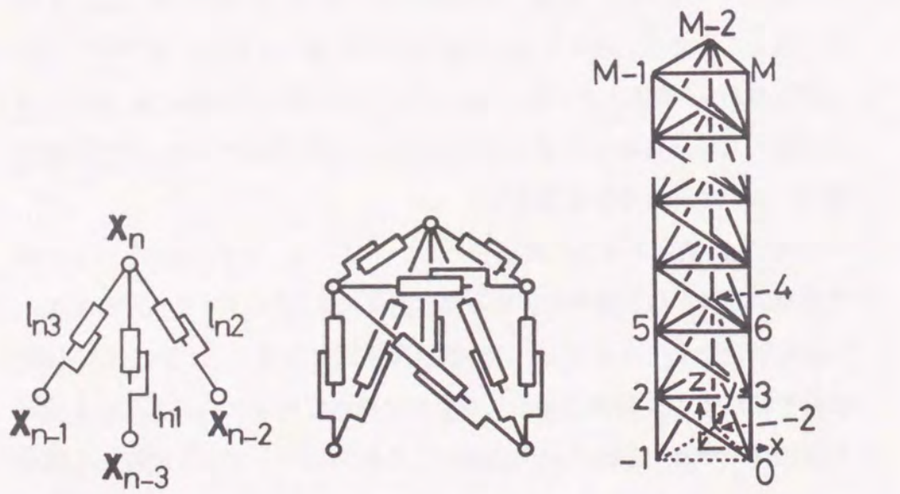
本章では, 適応トラスの機構学について述べる. まず, 適応トラスの研究全般の基礎となる概念モデルの機構関係式を, その基本構成単位である四面体構造のトラスモジュールの機構関係式より導く. つぎに, 節点部に部材を接続する複数のジョイントを持つ節点ブロックを導入した実現可能な機構モデル (実モデル) を構築し, これらのジョイント回転中心間のオフセット (節点オフセット) を考慮した機構関係式の定式化を行う. 概念モデルおよび実モデルの機構関係式に基づく機構運動シミュレーションを行い, 節点オフセットの影響について検討する.

2.2 概念モデルとその機構学

2.2.1 適応トラスの構成

本論文で取り扱う適応トラスは, ヘリカルマストと呼ばれる立体静定トラスのトポロジを持ち, 基本構成単位は, 図 2.1(a) に示す 3 本の可変長部材からなるトラスモジュールである. このトラスモジュールを図 2.1(b) に示すように 3 つ重ねたトラスユニットの一次元的な繰り返しにより, 図 2.1(c) の適応トラス[1] が構成される.

節点には図 2.1(c) に示すようにベース側から順に番号を付ける. また, 節点 n を頂点とするトラスモジュールに番号 n を付し, 3 本の可変長部材にはそれぞれベース側の節点の番号順に $n1$, $n2$, $n3$ の番号を付す (図



(a) トラスモジュール　(b) トラスユニット　(c) M モジュールトラス

図 2.1: ヘリカルマスト形適応トラスの概念モデル

[1] 部材が可変長であることを示す機構記号は, 図を簡略化するために, 以降においても, 特に必要な場合を除いてこのように省略することとする.

2.1(a)). 部材 $n1$ は, 直立した状態の適応トラスにおける縦部材である. ベース節点にも同様に, -2, -1, 0 の各番号を割り付けることとする.

全体座標系 Cの原点をベースの三角形の図心にとり, 図 2.1(c) に示すように x 軸, y軸, z軸を定める. 節点 n の座標ベクトルを$\boldsymbol{X}_n = [x_{nx}, x_{ny}, x_{nz}]^T$, トラスモジュール n に属する 3 本の可変長部材の部材長 l_{n1}, l_{n2}, l_{n3}をまとめて$\boldsymbol{L}_n = [l_{n1}, l_{n2}, l_{n3}]^T$で表す.

2.2.2 機構運動の記述

概念モデルにおいては, トラスモジュール n (n = 1,2,$\cdots$,M) の姿勢を表すのはその頂点となる節点の位置$\boldsymbol{X}_n$およびベース側の 3 節点の位置$\boldsymbol{X}_{n-3}$, $\boldsymbol{X}_{n-2}$, $\boldsymbol{X}_{n-1}$であり, 部材長ベクトル$\boldsymbol{L}_n$との間に, 次の幾何学的関係が成り立つ.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L}_n &= \begin{bmatrix} l_{n1} \\ l_{n2} \\ l_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-3})^T(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-3})]^{(1/2)} \\ [(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-2})^T(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-2})]^{(1/2)} \\ [(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-1})^T(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-1})]^{(1/2)} \end{bmatrix} \\ &= \boldsymbol{L}_n^X(\boldsymbol{X}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}) \end{aligned} \tag{2.1}$$

式 (2.1) の逆関係より,

$$\boldsymbol{X}_n = \boldsymbol{X}_n^L(\boldsymbol{L}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}) \tag{2.2}$$

としてトラスモジュール n の順機構関係式が得られる[2]. 節点位置$\boldsymbol{X}_n$は, 式 (2.2) を再帰的に組み合わせることにより, 部材長さ$\boldsymbol{L}_1, \cdots, \boldsymbol{L}_n$とベース節点位置$\boldsymbol{X}_{-2}, \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0$の関数として

$$\boldsymbol{X}_1 = \boldsymbol{X}_1^L(\boldsymbol{L}_1; \boldsymbol{X}_{-2}, \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0)$$

[2] ここで用いられているセミコロン (;) は, 関数$\boldsymbol{L}_n^X$および$\boldsymbol{X}_n^L$における主たる変数$\boldsymbol{X}_n$および$\boldsymbol{L}_n$と, それ以外の付帯的な変数$\boldsymbol{X}_{n-3}$, $\boldsymbol{X}_{n-2}$, $\boldsymbol{X}_{n-1}$とを区別するためのものである. 本論文の以後の部分でも, セミコロンはこれと同じ意味で用いるものとする.

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{X}_2 &= \boldsymbol{X}_2^L(\boldsymbol{L}_2; \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{X}_1) \\
&= \boldsymbol{X}_2^L(\boldsymbol{L}_2; \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{X}_1^L(\boldsymbol{L}_1; \boldsymbol{X}_{-2}, \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0)) \\
\boldsymbol{X}_3 &= \boldsymbol{X}_3^L(\boldsymbol{L}_3; \boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2) \\
&= \boldsymbol{X}_3^L(\boldsymbol{L}_3; \boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{X}_1^L(\boldsymbol{L}_1; \boldsymbol{X}_{-2}, \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0), \\
&\qquad \boldsymbol{X}_2^L(\boldsymbol{L}_2; \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{X}_1^L(\boldsymbol{L}_1; \boldsymbol{X}_{-2}, \boldsymbol{X}_{-1}, \boldsymbol{X}_0))) \\
&\cdots
\end{aligned}
\tag{2.3}
$$

と表され, 適応トラス全体では,

$$
\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \tag{2.4}
$$

としてまとめられる. ここで, $\boldsymbol{X} = [\boldsymbol{X}_1^T, \cdots, \boldsymbol{X}_M^T]^T$ は適応トラス全体の節点位置をまとめたベクトルであり, $\boldsymbol{L} = [\boldsymbol{L}_1^T, \cdots, \boldsymbol{L}_M^T]^T$ は全部材長ベクトル, また, $\boldsymbol{X}_B = [\boldsymbol{X}_{-2}^T, \boldsymbol{X}_{-1}^T, \boldsymbol{X}_0^T]^T$ はベースの 3 節点の位置をまとめたものである.

機構運動の基礎となる増分形の運動表記は, 式 (2.2) の全微分 (付録 A.1 参照)

$$
d\boldsymbol{X}_n = \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} d\boldsymbol{L}_n + \sum_{k=1}^{3} \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-4+k}} d\boldsymbol{X}_{n-4+k} \tag{2.5}
$$

より導かれ, 適応トラス全体では次式のように整理することができる.

$$
\begin{aligned}
d\boldsymbol{X} &= \frac{\partial \boldsymbol{X}}{\partial \boldsymbol{L}} d\boldsymbol{L} \\
&= \boldsymbol{J}^{XL} d\boldsymbol{L}
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

ここで, $\boldsymbol{J}^{XL}$は適応トラス全体の機構関係に関するヤコビ行列であり, 3×3 の小行列よりなる次のようなブロック下三角行列となる.

$$
\boldsymbol{J}^{XL} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{11}^{XL} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{J}_{M1}^{XL} & \cdots & \boldsymbol{J}_{MM}^{XL} \end{bmatrix} \tag{2.7}
$$

ここで, $\boldsymbol{J}_{ij}^{XL}$は

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{J}_{ij}^{XL} &= \frac{\partial \boldsymbol{X}_i}{\partial \boldsymbol{L}_j} \\
&= \begin{cases}
\displaystyle\sum_{k=1}^{3} \frac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}}{\partial \boldsymbol{L}_j} & \\
\quad = \displaystyle\sum_{k=1}^{3} \frac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}} \boldsymbol{J}_{(i-4+k)j}^{XL} & (i > j) \\
\dfrac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{L}_i} & (i = j) \\
\boldsymbol{O} & (i < j)
\end{cases} \\
&\qquad (i = 1, \cdots, M;\ j = 1, \cdots, M)
\end{aligned}
\tag{2.8}
$$

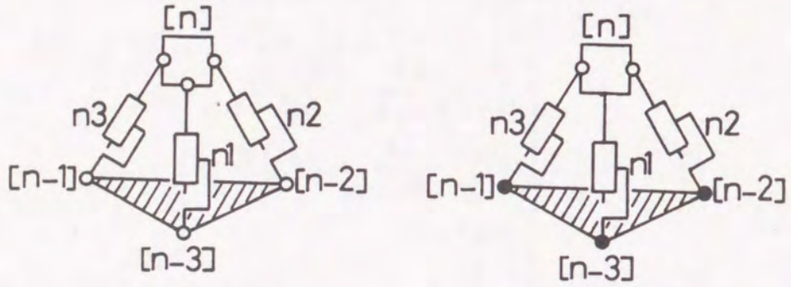
として, トラスモジュールの増分関係式 (2.5) を組み合わせて得られる.

2.3 節点オフセットを考慮した実モデル

2.3.1 概念モデルから実モデルへ

適応トラスの概念モデルは, 理想的なトラス構造を考えているので, 節点で 6 本の部材が回転自由に連結され, かつその回転中心が一致することを想定している. しかしながら, ボールジョイントのような通常の回転ジョイントは 2 リンク対偶であり, 6 本のリンクすなわちトラス部材を概念モデルの条件を満足するように連結するのは容易なことではない. そこで, 部材を接続するジョイントの回転中心間のオフセットを許容するような構成について検討する. すなわち, 図 2.2(a) に示すような, 複数のジョイントを持つ節点ブロックを導入したトラスモジュールの基本構想を考える.

トラスモジュールは, 部材長を定めればその姿勢が一意に定まり, 各部材長は独立に調節可能であるという, 適応トラスの基本的性質を保持し



(a) 基本構造　　(b) 自由度配分

図 2.2: 節点オフセットを許容したトラスモジュールの自由度配分
(○: 3 自由度対偶, ●: 2 自由度対偶)

なければならない. これは, リンク機構としてのトラスモジュールの自由度が 3 であることに帰着される. リンクを構成するすべての対偶が 2 リンク対偶である立体リンク機構の自由度 Fは, 次に示すグリュブラーの式[32]により算定できる.

$$F = 6(N - J - 1) + \sum_{j=1}^{J} f_j \tag{2.9}$$

ここで, Nはリンクの数, Jは対偶の数, f_jは対偶 jの自由度である. 図 2.2(a) に示すトラスモジュールの基本構造の自由度は式 (2.9) より

$$F = 6(8 - 9 - 1) + (3 \times 6 + 1 \times 3) = 9$$

となり, 必要な自由度数 3 に対して 6 自由度が過剰となっている. そこで, 縦部材 $n1$ の節点 n 側の対偶を取り除き, ベース側の対偶をすべて 2 自由度の対偶に置き換える (図 2.2(b)). このようにして得られたトラスモジュールの自由度は, 式 (2.9) より,

$$F = 6(7 - 8 - 1) + (3 \times 2 + 2 \times 3 + 1 \times 3) = 3$$

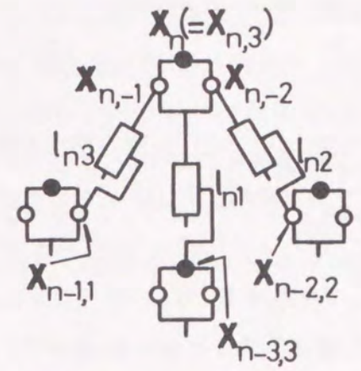


図 2.3: トラスモジュールの実モデル
(○: 3 自由度ボールジョイント,
●: 2 自由度ユニバーサルジョイント)

となり, 適応トラスのトラスモジュールに要求される基本的特性を満足する. グリュブラーの式は吟味を必要とするが, 図 2.2(b) に示す機構の自由度が 3 であることは, 容易に確認できる. なお, 図 2.2(b) において部材 $n2$ および $n3$ のベース側の対偶を 3 自由度とした場合においても, 機構としての自由度は 5 となるが, 過剰となる 2 自由度は部材 $n2$ および $n3$ 自身の部材軸回りの回転であり, トラスモジュールの姿勢に影響を与えるものではない. したがって, このような自由度配分による機構を用いたトラスモジュールの構成も可能であることがわかる.

以上のような考察に基づき, 3 自由度の対偶としてボールジョイント, 2 自由度の対偶としてユニバーサルジョイントを用いた場合のトラスモジュールの実モデルの構成を図 2.3に示す. 本論文では, 以後特に断らない限り, 実モデルとしてこのような機構を想定して議論を行う.

2.3.2 機構関係の定式化

(1) 節点座標系の導入

実モデルでは, 図 2.3に示すように, 各節点部に複数のジョイントが存在する. これらを区別するために, 節点部 n と n'とを連結する部材の節点部 n 側ジョイントに, n'と n との差 $a = n' - n$ を第 2 の指標として, $[n, a]$ なる対を番号として付与する. なお, 節点部 n には $[n, -3]$ なるジョイントは存在しないが, 便宜上ジョイント $[n, 3]$ と同じ位置に存在すると考えておく. 節点部 n を代表する点としてジョイント $[n, 3] = [n, -3]$ の回転中心を用いる. 部材の番号, ならびに全体座標系 Cの定義は 2.2.1節と同じである.

概念モデルの場合には, 各節点に一つの回転中心を考えればよいため, トラスモジュールの姿勢をその頂点およびベース側の 3 節点の位置のみで表すことができたが, 実モデルでは, 各節点にトラス複数のジョイント回転中心が存在するため, 節点部の位置のみならず方向をも考慮する必要がある. 節点部 n の方向を表すために, 節点座標系 C_nを図 2.4に示す

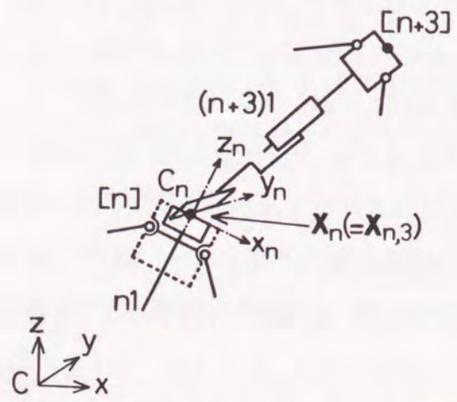


図 2.4: 節点座標系 C_nの定義

ように定義する. すなわち, 節点部 n の代表点であるジョイント $[n, 3](= [n, -3])$ の回転中心に原点をとり, トラスモジュール n と $n+3$ の縦部材, $n1$ と $(n+3)1$ とが直線をなすとき (中立状態) のユニバーサルジョイント $[n, 3]$ の, 部材 $(n+3)1$ および $n1$ 側の回転軸方向にそれぞれ x_n軸および y_n軸を定め, 部材 $n1$ から $(n+3)1$ の方向に z_n軸をとる. 節点座標系 C_nを参照したベクトル$\boldsymbol{x}^{(n)}$の全体座標系 Cへの変換式は次のようになる.

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{Q}_n \boldsymbol{x}^{(n)} + \boldsymbol{X}_n \tag{2.10}$$

ここで, 上添字 (n) は節点座標系 C_nで表された量であることを示し, $\boldsymbol{X}_n$ は全体座標系 Cを参照した節点部 n の代表点の位置ベクトル, $\boldsymbol{Q}_n$は節点部 n の方向を表す回転角ベクトル$\boldsymbol{\Theta}_n = [\theta_{nx}, \theta_{ny}, \theta_{nz}]^T$ によって定まる回転マトリクスである. 本論文では, 回転角としてロール·ピッチ·ヨー[101] を用いる. すなわち,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Q}_n &= \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{\Theta}_n) = \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n) \\ &= \mathbf{RPY}(\theta_{nz}, \theta_{ny}, \theta_{nx}) \\ &= \mathbf{Rot}(z, \theta_{nz})\mathbf{Rot}(y, \theta_{ny})\mathbf{Rot}(x, \theta_{nx}) \end{aligned} \tag{2.11}$$

となる. ここで Rot は指定された軸まわりの回転行列を与える関数である.

(2) 機構関係の記述

概念モデルの式 (2.1) に対応する幾何学的関係式

$$\boldsymbol{L}_n = \begin{bmatrix} l_{n1} \\ l_{n2} \\ l_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(\boldsymbol{X}_{n,-3} - \boldsymbol{X}_{n-3,3})^T (\boldsymbol{X}_{n,-3} - \boldsymbol{X}_{n-3,3})]^{(1/2)} \\ [(\boldsymbol{X}_{n,-2} - \boldsymbol{X}_{n-2,2})^T (\boldsymbol{X}_{n,-2} - \boldsymbol{X}_{n-2,2})]^{(1/2)} \\ [(\boldsymbol{X}_{n,-1} - \boldsymbol{X}_{n-1,1})^T (\boldsymbol{X}_{n,-1} - \boldsymbol{X}_{n-1,1})]^{(1/2)} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

が, 実モデルの機構関係の記述の出発点となる (図 2.3参照). ここで, $\boldsymbol{X}_{n,a}$ は節点部 n のジョイント $[n,a]$ の位置を表し, 節点座標系 C_nを参照した代表点からのオフセット量を表すベクトル$\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}$(定数) を用いて

$$\boldsymbol{X}_{n,a} = \boldsymbol{Q}_n \boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)} + \boldsymbol{X}_n \tag{2.13}$$

と表される (式 (2.10) 参照). ただし, $\boldsymbol{S}_{n,-3}^{(n)} = \boldsymbol{S}_{n,3}^{(n)} = \boldsymbol{O}$すなわち$\boldsymbol{X}_{n,-3} = \boldsymbol{X}_{n,3} = \boldsymbol{X}_n$である. 式 (2.13) を考慮すれば, 式 (2.12) は次のように整理することができる[3].

$$\boldsymbol{L}_n = \boldsymbol{L}_n^{XQ}(\boldsymbol{X}_n, \boldsymbol{Q}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{Q}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}, \boldsymbol{Q}_{n-1}) \tag{2.14}$$

式 (2.14) の関係を求めたことで, 概念モデルの場合と同様に, この逆関係からトラスモジュールの順機構関係式が求められるように思えるかもしれないが, トラスモジュール n のベース側の 3 つの節点部 $j = n-3, n-2, n-1$ の位置$\boldsymbol{X}_j$と方向$\boldsymbol{\Theta}_j$すなわち$\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{\Theta}_j)$ が定められたときに部材長$\boldsymbol{L}_n$の 3 成分を与えても, 頂点の節点部の位置$\boldsymbol{X}_n$と方向$\boldsymbol{\Theta}_n$の 6 成分を式 (2.14) だけで定めることはできない. これを定めるためには, 以下のような考察が必要となる.

図 2.5に示す節点部 $n-3$ のユニバーサルジョイント $[n-3,3]$ の x_{n-3}, y_{n-3}の各軸回りの回転角α_{n-3}, β_{n-3} および縦部材 $n1$ の長さ l_{n1}を用いれば, 節点座標系 C_{n-3}を参照した節点部 n の位置および方向が次のように求められる.

$$\boldsymbol{Q}_n^{(n-3)} = \mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3}) \tag{2.15}$$

[3] 式 (2.14) において, 本来ならば回転行列$\boldsymbol{Q}_j (j = n-3, n-2, n-1, n)$ ではなくその引数である方向$\boldsymbol{\Theta}_j$を用いなければならないが, 以降の議論では$\boldsymbol{\Theta}_j$は回転行列$\boldsymbol{Q}_j$の引数としてのみ現れることから, $\boldsymbol{Q}_j$を用いた表記をとっておく. しかしながら, 回転行列$\boldsymbol{Q}_j$の 9 成分は独立ではなく, その引数である$\boldsymbol{\Theta}_j$の 3 成分が独立であることに注意しなければならない.

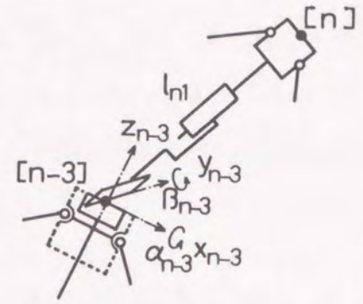


図 2.5: 機構関係の記述のための補助変数$\boldsymbol{A}_n$

$$\boldsymbol{X}_n^{(n-3)} = \mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_{n1} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

式 (2.15) および (2.16) を, 式 (2.10) を用いて全体座標系に変換する.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Q}_n &= \boldsymbol{Q}_{n-3}\boldsymbol{Q}_n = \boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3}) \\ &= \boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n; \boldsymbol{Q}_{n-3}) \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X}_n &= \boldsymbol{Q}_{n-3}\boldsymbol{X}_n^{(n-3)} + \boldsymbol{X}_{n-3} \\ &= \boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_{n1} \end{bmatrix} + \boldsymbol{X}_{n-3} \\ &= \boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}) \end{aligned} \tag{2.18}$$

ここで, $\boldsymbol{A}_n = [\alpha_{n-3}, \beta_{n-3}, l_{n1}]^T$なる補助変数を用いた. 式 (2.15) および (2.17) は行列値関数であるが, 式 (2.11) と組み合わせて考えれば, 節点部 n の回転角ベクトル$\boldsymbol{\Theta}_n$が, 補助変数$\boldsymbol{A}_n$のα_{n-3}, β_{n-3}と節点部 $n-3$ の回転角ベクトル$\boldsymbol{\Theta}_{n-3}$に依存することを示したものとわかる[4].

[4] 本論文の以後の部分でも節点部の方向を表すのに$\boldsymbol{\Theta}_n$のかわりに$\boldsymbol{Q}_n$を用いることがあるが, これらについても同様である.

式 (2.14) は, 式 (2.17) および (2.18) を代入することにより,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L}_n &= \boldsymbol{L}_n^{XQ}(\boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3}),\boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n;\boldsymbol{Q}_{n-3});\\ &\qquad \boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1})\\ &= \boldsymbol{L}_n^A(\boldsymbol{A}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad (2.19)\end{aligned}$$

となる. この逆関係

$$\boldsymbol{A}_n = \boldsymbol{A}_n^L(\boldsymbol{L}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad (2.20)$$

を用いれば, トラスモジュール n の頂点の節点部の位置 $\boldsymbol{X}_n$ および方向 $\boldsymbol{Q}_n$ が, 部材長さ $\boldsymbol{L}_n$ と下方の 3 節点 $j = n-3, n-2, n-1$ の位置 $\boldsymbol{X}_j$ および方向 $\boldsymbol{Q}_j$ の関数として, 式 (2.18) および (2.17) より次のように得られる.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{X}_n &= \boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3})\\ &= \boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n^L(\boldsymbol{L}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1});\\ &\qquad \boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3})\\ &= \boldsymbol{X}_n^L(\boldsymbol{L}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad (2.21)\\ \boldsymbol{Q}_n &= \boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n;\boldsymbol{Q}_{n-3})\\ &= \boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n^L(\boldsymbol{L}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1});\boldsymbol{Q}_{n-3})\\ &= \boldsymbol{Q}_n^L(\boldsymbol{L}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad (2.22)\end{aligned}$$

式 (2.21) および (2.22) が, 概念モデルの式 (2.2) に対応するトラスモジュールの実モデルの順機構関係式である[5]. また, 式 (2.18) の逆関係

$$\boldsymbol{A}_n = \boldsymbol{A}_n^X(\boldsymbol{X}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3}) \quad (2.23)$$

[5] 式 (2.21) の関数 $\boldsymbol{X}_n^L$ は, 概念モデルの式 (2.2) の $\boldsymbol{X}_n^L$ とは異なるものであるが, その意味するところは同じであり, 必要な場合の区別も容易であることから同一の関数名を用いている. 以後, 概念モデルと実モデルで変数名・関数名の重複がある場合も同様である.

を式 (2.17) に代入し, これを式 (2.14) に代入すれば, トラスモジュール n の部材長 $\boldsymbol{L}_n$ が, その頂点の節点位置 $\boldsymbol{X}_n$ と, 下方の 3 節点 $j = n-3, n-2, n-1$ の位置 $\boldsymbol{X}_j$ および方向 $\boldsymbol{Q}_j$ の関数

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L}_n &= \boldsymbol{L}_n^{XQ}(\boldsymbol{X}_n,\boldsymbol{Q}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1})\\ &= \boldsymbol{L}_n^{XQ}(\boldsymbol{X}_n,\boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n^X(\boldsymbol{X}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3});\boldsymbol{Q}_{n-3});\\ &\qquad \boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1})\\ &= \boldsymbol{L}_n^X(\boldsymbol{X}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad (2.24)\end{aligned}$$

として得られる.

以上のように, 部材の集中する節点部に, 回転中心を共有しない複数のジョイントを持つことを許した適応トラスの実モデルにおいても, 概念モデルの場合と同様にベースの 3 つの節点部−2,−1,0 の位置および方向から逐次的に全体の姿勢が定まることがわかる. 式 (2.21) および (2.22) を式 (2.3) と同様に再帰的に組み合わせることにより, 節点部の位置 $\boldsymbol{X}_1$, $\cdots$, $\boldsymbol{X}_M$ が部材長 $\boldsymbol{L}_1$, $\cdots$, $\boldsymbol{L}_M$ の関数として得られ, 概念モデルの式 (2.4) に対応する適応トラス全体の順機構関係式が次のようにまとめられる.

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}^L(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B,\boldsymbol{Q}_B) \quad (2.25)$$

ここで $\boldsymbol{Q}_B = [\boldsymbol{Q}_{-2}^T, \boldsymbol{Q}_{-1}^T, \boldsymbol{Q}_0^T]^T$ は, ベースに位置する 3 つの節点部の方向をまとめたものである.

なお, 式 (2.20) の関係を (2.19) の逆関係として解析的に求めることは困難であるため, 実モデルの機構関係式の計算は必然的に数値的なものとなる.

(3)　増分形の運動の記述

適応トラスの実モデルの増分形の運動表記は, 式 (2.21) および (2.22) の全微分

$$
\begin{aligned}
d\boldsymbol{X}_n &= \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} d\boldsymbol{L}_n \\
&\quad + \sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-4+k}} d\boldsymbol{X}_{n-4+k} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-4+k}} d\boldsymbol{Q}_{n-4+k} \right] \qquad (2.26)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
d\boldsymbol{Q}_n &= \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} d\boldsymbol{L}_n \\
&\quad + \sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-4+k}} d\boldsymbol{X}_{n-4+k} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-4+k}} d\boldsymbol{Q}_{n-4+k} \right] \qquad (2.27)
\end{aligned}
$$

より導くことができ, 概念モデルの場合と同様に, 適応トラス全体では

$$
\begin{aligned}
d\boldsymbol{X} &= \frac{\partial \boldsymbol{X}}{\partial \boldsymbol{L}} d\boldsymbol{L} \\
&= \boldsymbol{J}^{XL} d\boldsymbol{L} \qquad (2.28)
\end{aligned}
$$

とまとめられる. ここで, $\boldsymbol{J}^{XL}$は全体の機構関係に対するヤコビ行列

$$
\boldsymbol{J}^{XL} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{11}^{XL} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{J}_{M1}^{XL} & \cdots & \boldsymbol{J}_{MM}^{XL} \end{bmatrix} \qquad (2.29)
$$

であり, 概念モデルの場合と同様に 3×3 の小行列よりなるブロック下三角行列となる. ここで, トラスモジュール毎のヤコビ行列$\boldsymbol{J}_{ij}^{XL}$は, 実モデルの場合には

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{J}_{ij}^{XL} &= \frac{\partial \boldsymbol{X}_i}{\partial \boldsymbol{L}_j} \\
&= \begin{cases}
\displaystyle\sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}}{\partial \boldsymbol{L}_j} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-4+k}} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{Q}_{i-4+k}}{\partial \boldsymbol{L}_j} \right] & \\
= \displaystyle\sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}} \boldsymbol{J}_{(i-4+k)j}^{XL} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-4+k}} \boldsymbol{J}_{(i-4+k)j}^{QL} \right] & (i > j) \\
\dfrac{\partial \boldsymbol{X}_i^L}{\partial \boldsymbol{L}_i} & (i = j) \\
\boldsymbol{O} & (i < j)
\end{cases} \\
&\quad (i = 1, \cdots, M;\ j = 1, \cdots, M) \qquad (2.30)
\end{aligned}
$$

と表される. ただし,

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{J}_{ij}^{QL} &= \frac{\partial \boldsymbol{Q}_i}{\partial \boldsymbol{L}_j} \\
&= \begin{cases}
\displaystyle\sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}_i^L}{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}}{\partial \boldsymbol{L}_j} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_i^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-4+k}} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{Q}_{i-4+k}}{\partial \boldsymbol{L}_j} \right] & \\
= \displaystyle\sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}_i^L}{\partial \boldsymbol{X}_{i-4+k}} \boldsymbol{J}_{(i-4+k)j}^{XL} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_i^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{i-4+k}} \boldsymbol{J}_{(i-4+k)j}^{QL} \right] & (i > j) \\
\dfrac{\partial \boldsymbol{Q}_i^L}{\partial \boldsymbol{L}_i} & (i = j) \\
\boldsymbol{O} & (i < j)
\end{cases} \\
&\quad (i = 1, \cdots, M;\ j = 1, \cdots, M) \qquad (2.31)
\end{aligned}
$$

である. これらの増分形の機構関係の導出の詳細は付録 A.2節に示す.

以上の増分関係を考える際に, 本来ならば, 節点部の方向を表す回転行列$\boldsymbol{Q}_n$の増分ではなく, 回転角$\boldsymbol{\Theta}_n$の増分を取り扱わねばならないが, 式 (2.29) の導出過程では$\boldsymbol{\Theta}_n$は常に$\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{\Theta}_n)$ の形で現れ, かつ, 最終的には消去されるため, $\boldsymbol{Q}_n$を用いた上記の展開でも不都合が生じないことを付記しておく.

2.4 作業空間ベクトル

ロボット, 工作機械などの機械システムが行う作業は, 一般に, いくつかのパラメータを用いて記述される. それらのパラメータにより張られる空間を作業空間, また, それらのパラメータをまとめたベクトルを作業空間ベクトル (あるいは作業ベクトル) と呼び, システムが達成すべき目標を記述するために用いられる. ここでは, 本論文を通じて用いる適応トラスの作業空間を定義し, これと節点位置および部材長との間に成り立つ機構関係式を導く.

2.4.1 適応トラスの作業空間

本論文では, 適応トラスの先端の 3 部材を取り除いて三角形のプレートを配置し, これを何らかの装置の台座とみなして, その位置と方向により適応トラスの果たすべき作業が記述される場合を考える[6]. 実モデルの場合には, 適応トラスの先端は図 2.6に示すようにボールジョイントを介してこのプレートを支持するものとなる. これは, 機構的には最上部の部材 $(M-1)3$, $M2$, $M3$ を固定長とし, これらの部材を接続するジョイントの回転中心をプレートを支持するボールジョイントの回転中心にとることと等価である.

適応トラスの作業空間ベクトルを, プレートの図心の位置$\boldsymbol{X}_W = [x_{Wx}, x_{Wy}, x_{Wz}]^T$および方向$\boldsymbol{\Theta}_W = [\theta_{Wx}, \theta_{Wy}, \theta_{Wz}]^T$を用いて次のように定義する.

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_W \\ \boldsymbol{\Theta}_W \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

なお, 簡単のためプレートは正三角形であり, ベースの 3 節点の位置$\boldsymbol{X}_{-2}$,

[6] このことは必要条件ではない. 適応トラスの幾何形態のいかなる部分を用いて作業を記述しても, 基本的な考え方に差異は生じない.

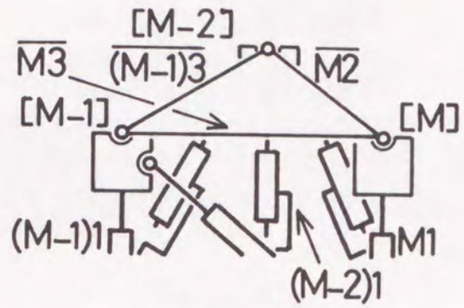


図 2.6: 適応トラスの実モデルの先端部

$\boldsymbol{X}_{-1}$, $\boldsymbol{X}_0$により構成される三角形と合同であることを想定するならば, 次のような具体的表現となる. 先端の 3 節点の位置$\boldsymbol{X}_T = [\boldsymbol{X}_{M-2}^T, \boldsymbol{X}_{M-1}^T, \boldsymbol{X}_M^T]^T$は, 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$により, 次のように表される.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X}_T &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{M-2} \\ \boldsymbol{X}_{M-1} \\ \boldsymbol{X}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}_W & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{Q}_W & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{Q}_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{-2} \\ \boldsymbol{X}_{-1} \\ \boldsymbol{X}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_W \\ \boldsymbol{X}_W \\ \boldsymbol{X}_W \end{bmatrix} \\ &= \boldsymbol{X}_T^W(\boldsymbol{W}) \end{aligned} \tag{2.33}$$

ここで,

$$\boldsymbol{Q}_W = \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_W) \tag{2.34}$$

であり, $\boldsymbol{X}_T = \boldsymbol{X}_B$すなわちベースの 3 節点の位置を$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{O}$に対応する$\boldsymbol{X}_T$の基準位置とした. 式 (2.33) の逆関係は, 直接求めることはできないが, プレートが正三角形であることを利用して付録 A.3節に示すような手順により計算することができ, 形式的には次のように表すことができる.

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{X}_T) \tag{2.35}$$

ただし, 式 (2.35) における$\boldsymbol{X}_T$すなわち先端の 3 節点の位置は, 次の拘束

条件を満たさねばならないことに注意が必要である.

$$\begin{aligned} |\boldsymbol{X}_{M-2} - \boldsymbol{X}_{M-1}| &= \text{const} \\ |\boldsymbol{X}_{M-1} - \boldsymbol{X}_{M}| &= \text{const} \\ |\boldsymbol{X}_{M} - \boldsymbol{X}_{M-2}| &= \text{const} \end{aligned} \tag{2.36}$$

式 (2.35) に式 (2.4)(概念モデル) あるいは (2.25)(実モデル) を組み合わせることにより, 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$と全部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$との間に成り立つ機構関係式が

$$\begin{aligned} \boldsymbol{W} &= \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{X}_T) = \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{B}_{X_T}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B)) \\ &= \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B) \end{aligned} \tag{2.37}$$

あるいは

$$\begin{aligned} \boldsymbol{W} &= \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{X}_T) = \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{B}_{X_T}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B),\boldsymbol{Q}_B)) \\ &= \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B,\boldsymbol{Q}_B) \end{aligned} \tag{2.38}$$

として得られる. ただし, $\boldsymbol{B}_{X_T}$は, 全節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$から先端の 3 節点の位置$\boldsymbol{X}_T$を取り出すためのブール行列

$$\boldsymbol{B}_{X_T} = [\boldsymbol{O}_{9\times(3M-9)}, \boldsymbol{I}_9] \tag{2.39}$$

である.

作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$と先端の 3 節点の位置$\boldsymbol{X}_T$との間の増分関係は, 式 (2.33) より,

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_T^W}{\partial \boldsymbol{W}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{M-2}}{\partial \boldsymbol{W}} \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{M-1}}{\partial \boldsymbol{W}} \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{M}}{\partial \boldsymbol{W}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & \dfrac{\partial(\boldsymbol{Q}_W \boldsymbol{X}_{-2})}{\partial \boldsymbol{\Theta}_W} \\ \boldsymbol{I}_3 & \dfrac{\partial(\boldsymbol{Q}_W \boldsymbol{X}_{-1})}{\partial \boldsymbol{\Theta}_W} \\ \boldsymbol{I}_3 & \dfrac{\partial(\boldsymbol{Q}_W \boldsymbol{X}_{0})}{\partial \boldsymbol{\Theta}_W} \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

となり, これより,

$$\frac{\partial \boldsymbol{W}^{X_T}}{\partial \boldsymbol{X}_T} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{X}_T^W}{\partial \boldsymbol{W}}\right)^- \tag{2.41}$$

が得られる. ここで, $(\,)^-$は反射形の一般逆行列[105]を表す. 式 (2.41) を用いれば, 式 (2.37)(概念モデル) あるいは (2.38)(実モデル) より, 式 (2.7) あるいは (2.29) の$\boldsymbol{J}^{XL}$を考慮して, 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$と全部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$との間の増分関係

$$d\boldsymbol{W} = \boldsymbol{J}^{WL} d\boldsymbol{L} \tag{2.42}$$

が得られる. ここで,

$$\boldsymbol{J}^{WL} = \frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial \boldsymbol{L}} = \frac{\partial \boldsymbol{W}^{X_T}}{\partial \boldsymbol{X}_T} \boldsymbol{B}_{X_T} \boldsymbol{J}^{XL} \tag{2.43}$$

である. 式 (2.42) は, 一般的な冗長ロボットアームの増分形の機構関係式と同等なものである.

2.4.2 実モデルの機構関係の記述における補助変数の意味

前節で定義した作業空間ベクトルを考慮すれば, 2.3.2節で述べた実モデルの機構関係の導出の際に用いた式 (2.17) および (2.18) における補助変数$\boldsymbol{A}_n$の意味は, 次のように解釈することができる. これらの関係式は, トラスモジュール n の頂点の位置および方向が縦部材 $n1$ の部材長 l_{n1}とそのベース側節点のユニバーサルジョイントの回転角α_{n-3}, β_{n-3}で定まることを示している. この 3 自由度は極座標系の成分をなしており, 適応トラスの縦部材のつながりは, 図 2.7に示すように極座標系ロボットアームを直列に連結したものとみなすことができる. この連続した極座標系アームの各々は, その先端で, 装置の台座となるプレートをボールジョイントを介して把持していることになる. したがって, 適応トラスは 3 台の

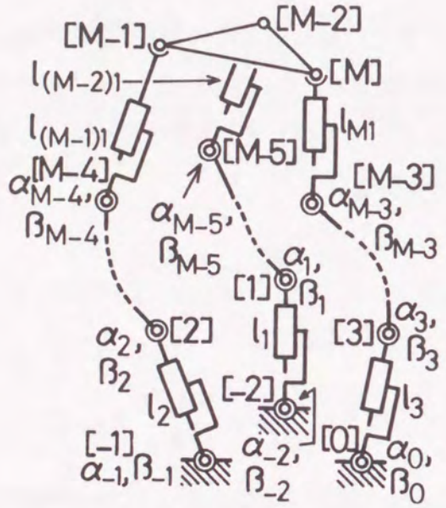


図 2.7: 直列形ロボットアームの協調系としての適応トラス

連続した極座標系アームが, 協調して一つのプレートをハンドリングしている状態に対応している. トラスモジュール n においては, 縦部材 $n1$ 以外の 2 つの部材の長さ l_{n2}, l_{n3}が, α_{n-3}とβ_{n-3}の 2 つの角度を調整するための自由度となっている.

2.5 機構運動シミュレーションによる節点オフセットの影響の評価

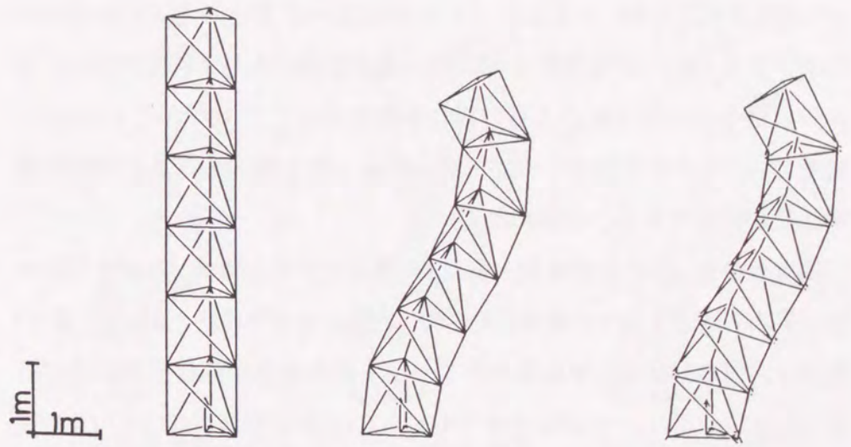
前節までで導いた機構関係式に基づき, 適応トラスの概念モデルと実モデルの機構運動シミュレーションを行う. 図 2.8に示す, 18 モジュールの適応トラスを考える. 作業空間ベクトルの定義から先端の 3 部材が固定長となるため, 全体での自由度は $3 \times 18 - 3 = 51$ 自由度となる. 増分

形の機構運動を考え,

$$d\boldsymbol{L} = (\boldsymbol{J}^{WL})^{-} d\boldsymbol{W} \tag{2.41}$$

として, 式 (2.42) におけるヤコビ行列$\boldsymbol{J}^{WL}$の疑似逆行列[105]を用いて各増分ステップにおける部材長変化 $d\boldsymbol{L}$を求める. これは, 冗長自由度の取り扱いに, 各増分ステップにおける部材長変化の二乗和を最小とする規範を採用したことに相当する.

図 2.8(a) に示す直立状態の初期姿勢 ($\boldsymbol{W}^0$ =[0, 0, 6(m), 0, 0, 0(deg)]^T) から, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}} = [\underline{\boldsymbol{X}_W}^T, \underline{\boldsymbol{\Theta}_W}^T]^T$ =[1, 0, 5(m), 0, −30, 0(deg)]^{T}まで等間隔の 10 増分ステップで機構運動を行い, 10 増分ステップ後の作業空間における偏差を第 11 ステップとして最終姿勢での補正を行った. 概念モデルおよび実モデルの適応トラスの最終姿勢を図 2.8(b) および (c) に示す. 実モデルにおけるオフセットの大きさは部材長さの



(a) 初期姿勢　(b) 概念モデル　(c) 実モデル

図 2.8: 適応トラスの機構運動シミュレーション

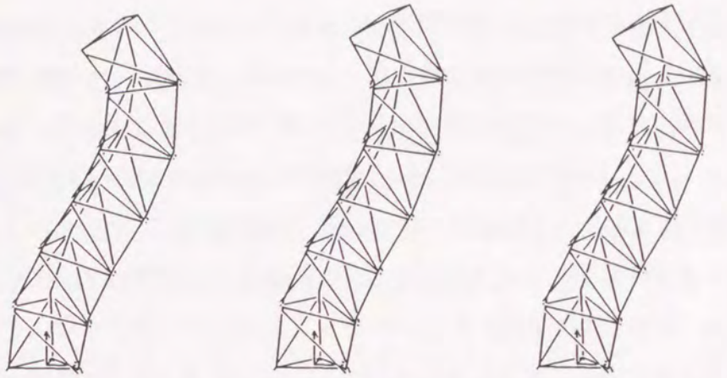
表 2.1: シミュレーションに用いた節点オフセット$\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}$(mm)*

n	a	x	y	z	n	a	x	y	z
1,4,7,10,13	-2	-50	25	-150	16	-2	-50	25	-150
	-1	50	25	-150		-1	50	25	-150
	1	-50	25	-100		1	0	0	0
	2	50	25	-100		2	0	0	0
2,5,8,11,14	-2	-50	25	-150	17	-2	-50	25	-150
	-1	50	25	-100		-1	0	0	0
	1	-50	25	-100		1	0	0	0
	2	50	25	-50		2	–	–	–
3,6,9,12,15	-2	-50	25	-100	18	-2	0	0	0
	-1	50	25	-100		-1	0	0	0
	1	-50	25	-50		1	–	–	–
	2	50	25	-50		2	–	–	–

* 節点座標系 C_n の原点が縦部材相互を接続するジョイント $n,3$ の回転中心であることから, $a=3$ については $\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}=[0,0,0]^T$ である.

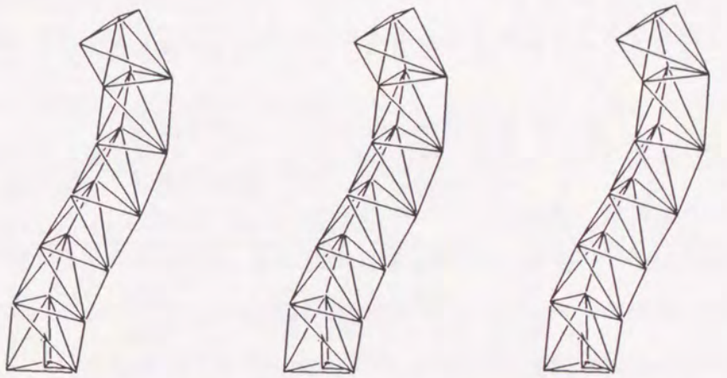
10%程度を想定した. シミュレーションに用いた, 節点座標系における節点オフセット$\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}$ の値を表 2.1に示す. 最終姿勢における作業空間ベクトルの目標からの誤差はどちらの場合も位置において 10^{-4}(m), 0.01(deg) 程度であり, 本章で提案した実モデルによっても概念モデルと同様の機構運動が可能であることがわかる.

節点オフセットの影響を調べるため, 概念モデルの機構関係式を用いて実モデルの適応トラスの機構運動を行った場合の結果を図 2.9および表 2.2に示す. 図 2.9(a)-(c) では節点オフセットの大きさが部材長さの 10%程度 (表 2.1), (d)-(f) では節点オフセットの大きさが部材長さの 1%程度 (表 2.1の (1/10)) の実モデルの適応トラスを想定している. 図 2.9(b)(c) および (e)(f) は, 作業空間ベクトルを観測するためのセンサを想定しており, (c) および (f) は, 増分ステップを 10 倍の 100 ステップ (+補正の



(a) センサを用いない (10 + 1 ステップ)　(b) センサを想定 (10 + 1 ステップ)　(c) センサを想定 (50 + 1 ステップ)

オフセット量:初期姿勢の縦部材の長さの 10%程度



(d) センサを用いない (10 + 1 ステップ)　(e) センサを想定 (10 + 1 ステップ)　(f) センサを想定 (50 + 1 ステップ)

オフセット量:初期姿勢の縦部材の長さの 1%程度

図 2.9: 概念モデルの機構関係式に基づく実モデルの機構運動

1 ステップ) とした. 表 2.2に, 最終姿勢の作業空間における目標との誤差および機構運動の計算に用いた概念モデルの節点位置と実モデルの機構運動により得られた節点位置との間の誤差を示す. 図 2.9を見れば, 何れの結果もほぼ同様の最終姿勢となっているが, 表 2.2に示した作業空間および節点位置における誤差は, それらの差異を明確に示している. 表 2.2に示した (a) の作業空間における誤差 94.3(mm) および 10.7(deg) と, (d) のそれ 6.93(mm) および 0.754(deg) を比較すれば, オフセットの大きさが機構的誤差に与える影響が線形に近いことが推測されるが, このことは, 同様の機構運動シミュレーションをさらに行うことにより確認することができる. また, 表 2.2において (a) (94.3(mm), 10.7(deg)) と (b) (8.74(mm), 1.33(deg)), あるいは (d) (6.93(mm), 0.754(deg)) と (e) (0.227(mm), 0.0333(deg)) の作業空間における誤差の比較により, 実モデルに基づく厳密な機構関係式を用いない機構運動を行った場合においても, 作業空間ベクトルを観測するためのセンサを用いることにより, 目標点との誤差が大きく低減されることがわかる. このことは, 室津らの最

表 2.2: 最終姿勢の作業空間における誤差

図 2.9	オフセット	センサの有無	増分数	誤差 (作業空間)* 位置 (mm)	方向 (deg)	誤差 (節点)** (mm)
(a)	10%	無	10 + 1	94.3	10.7	58.5
(b)		有	10 + 1	8.74	1.33	48.4
(c)		有	100 + 1	1.42	0.225	51.7
(d)	1%	無	10 + 1	6.93	0.754	4.52
(e)		有	10 + 1	0.227	0.0333	4.52
(f)		有	100 + 1	0.0327	0.00536	4.96

* 作業空間における誤差は, $\|\boldsymbol{X}_W - \underline{\boldsymbol{X}_W}\|$ および $\|\boldsymbol{\Theta}_W - \underline{\boldsymbol{\Theta}_W}\|$ により評価した.
** 節点位置に関する誤差は, $\|\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_n^{(I)}\|$ の平均値により評価した. ここで, $\boldsymbol{X}_n^{(I)}$ は概念モデルにもとづく計算により得られる節点位置である.

近の研究[77]による, 実機による実験においても確認されている. さらに, (b) と (c), (e) と (f) の比較から, 増分ステップの数を多くすること, すなわち各ステップの変化量を小さくすることにより線形化による誤差を低減し, 目標点との誤差をさらに抑えることができることが明らかにされている. しかしながら, 概念モデルと実モデルの節点位置における誤差は, 作業空間内でのセンサの有無にかかわらず (a)–(c) では 50(mm) 程度, (d)–(f) では 5(mm) 程度となっており, 適応トラス全体の姿勢を正しく制御するためには実モデルの機構関係式が必要となることがわかる.

2.6 おわりに

本章では, 適応トラスの研究全般の基礎となる機構学について述べた. 適応トラスの研究において広く用いられている理想的なトラス構造に基づくモデル (概念モデル) の機構関係を, 基本構成単位であるトラスモジュールの機構関係を組み合わせることにより導いた. また, その増分形の運動記述に用いられるヤコビ行列がブロック下三角行列となることを示した.

適応トラスの機構を実現するためには, 部材の集中する節点部に関する考察が必要不可欠である. 節点部に複数のジョイントを許容するモデル (実モデル) のトラスモジュールを, 概念モデルの持つ機構的な静定性を保持するように構築し, その機構関係を導出した. 概念モデルの場合と同様に, 適応トラス全体の機構関係がトラスモジュールの機構関係の組み合わせにより表現できることを示し, その増分形の運動記述に用いられるヤコビ行列が実モデルの場合にもブロック下三角行列となることを示した.

適応トラスの作業空間を定義し, 作業空間ベクトルに関する機構関係式を記述した. 作業空間ベクトルを含めた適応トラス全体の増分形の運

動表記を導き, 一般的な冗長ロボットアームと同等の関係式が得られることを示した.

構築したモデルに基づく機構運動シミュレーションを行い, 実モデルの場合にも概念モデルと同様の動作が可能であることを示した. また, 機構運動に際しての節点オフセットの影響をシミュレーションにより検討した. 得られた結果から, 適応トラス全体の姿勢を正確に制御するためには提案した実モデルの機構関係式が必要となることが確認された.

第3章

節点オフセットを考慮した動力学

3.1 はじめに

力学的特性は機械システムにおける重要な研究課題のひとつである. 適応トラスは, 構造物としての機能とメカニズムとしての機能を合わせ持つ機械システムであるため, 機構を設計し, 実現するためには, その動力学的特性を把握することが必要となる. しかしながら, 部材長を変化させる機構運動によりその形態が動的に変化するため, 適応トラスの動力学的ふるまいはロボットアーム等[101]と同様に非線形性の強い非常に複雑なものとなり, 解析的に解くことはできない. このような適応トラスの動力学的特性については, 計算的シミュレーションの視点等からいくつかの報告がある. 例えば, Das ら[16]は, 適応トラスを用いた宇宙用クレーンについて, 全体をいくつかのトラス・セクションに分割し, 一般のロボットアームと同様の取り扱いをすることにより可変長部材に加わる力や節点変位などを求めている. Hughes ら[39]は, 1.2節で紹介した VG トラスを用いたロボットアームの固有振動数と振動モードに言及しており, また, 瀬口ら[114]は, 機構運動を考慮した適応トラスの動力学シミュレーションを示している.

本章では, 適応トラスの構造的側面に着目したマトリクス構造解析手法[102]の拡張による手順[114]に基づき, 前章で導入した節点部のジョイン

ト回転中心間のオフセットを許容した適応トラスの実モデルの動力学について述べる. まず, 理想的なトラス構造を持つ概念モデルの運動を節点位置を用いて記述する. すなわち, ひずみエネルギ, 運動エネルギ, ポテンシャルエネルギの各エネルギの定式化を行い, 機構運動の動力学的側面を考慮したLagrangeの運動方程式を導く. 次に, 概念モデルと実モデルの力学的条件の違いについて考察し, 運動を記述する変数に節点部の方向を含めることによるエネルギの定式化の拡張を行い, 概念モデルと同様の形式の運動方程式を導出する. 得られた運動方程式に基づく実モデルの動力学シミュレーションを通じて, その動力学的特性を解析するとともに, 適応トラスの概念モデルに基づく場合との比較を行うことで, 実モデルにおける節点オフセットの動力学的特性に及ぼす影響について若干の検討を加える.

3.2 概念モデルの運動の記述

3.2.1 運動を記述する変数

適応トラスの変形記述は, その動力学的ふるまいを解析する基本である. ここでは2.2節で機構運動の記述に際して定義した変数を, 変形を考慮しない剛体運動に基づく状態を表すものとして用い, これらに加えて変形を考慮するための変数を新たに導入する. すなわち, 概念モデルのトラスモジュールnの運動を記述する変数として, 節点位置に関する変数

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X}_n &= [x_{nx}, x_{ny}, x_{nz}]^T \quad \text{剛体運動に基づく節点位置} \\ \boldsymbol{U}_n &= [u_{nx}, u_{ny}, u_{nz}]^T \quad \text{弾性変形による節点変位} \\ \boldsymbol{D}_n &= [d_{nx}, d_{ny}, d_{nz}]^T \quad \text{変形を考慮した節点位置} \end{aligned}$$

および, 部材長に関する変数

$$\begin{aligned} \boldsymbol{L}_n &= [l_{n1}, l_{n2}, l_{n3}]^T \quad \text{剛体運動に基づく部材長さ} \\ \boldsymbol{R}_n &= [r_{n1}, r_{n2}, r_{n3}]^T \quad \text{弾性変形による部材長変化} \\ \boldsymbol{H}_n &= [h_{n1}, h_{n2}, h_{n3}]^T \quad \text{変形を考慮した部材長} \end{aligned}$$

を定義する. これらの変数の間には次に示す関係が成り立つ.

$$\boldsymbol{D}_n = \boldsymbol{X}_n + \boldsymbol{U}_n \tag{3.1}$$

$$\boldsymbol{H}_n = \boldsymbol{L}_n + \boldsymbol{R}_n \tag{3.2}$$

また, 2.2節と同様に, 適応トラス全体についてまとめた変数

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{X}_M \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{U}_M \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{D}_M \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{L} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{L}_M \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{R}_M \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_M \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.3}$$

を必要に応じて用いることとする.

3.2.2 エネルギの定式化

Lagrangeの運動方程式を導くため, 系のエネルギの定式化を行う. エネルギを記述する変数としては, 節点位置に対応する$\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{U}$, $\boldsymbol{D}$を用いる.

(1) ひずみエネルギ

本論文では, 適応トラスの部材を線形弾性体ととらえ, その変形が微小である場合のみを対象とする. 部材niのひずみエネルギU_{ni}は弾性変形r_{ni}を用いて次のように表される.

$$U_{ni} = \frac{1}{2}\frac{EA}{l_{ni}} {r_{ni}}^2 \tag{3.4}$$

ここでEAは部材の引張り剛性を表す. 式(3.4)より, 適応トラス全体のひずみエネルギUは

$$U = \sum_{n=1}^{M} \sum_{i=1}^{3} U_{ni} \tag{3.5}$$

となり, 適応トラス全体の弾性変形による全部材長変化ベクトル$\boldsymbol{R}$を用いて次式のようにまとめることができる.

$$U = \frac{1}{2} \boldsymbol{R}^T \boldsymbol{K}^R \boldsymbol{R} \tag{3.6}$$

ここで$\boldsymbol{K}^R$は部材の弾性変形$\boldsymbol{R}$に対応する剛性マトリクスであり,

$$\boldsymbol{K}^R = \mathrm{diag}[\boldsymbol{K}_1^R, \cdots, \boldsymbol{K}_M^R] \tag{3.7}$$

$$\boldsymbol{K}_n^R = \mathrm{diag}\left[\frac{EA}{l_{n1}}, \frac{EA}{l_{n2}}, \frac{EA}{l_{n3}}\right] \tag{3.8}$$

となる.

式(3.6)から節点変位で表したひずみエネルギを求めるため, 次のような形式で表される弾性変形を考慮した適応トラスの機構関係を考える.

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{D}(\boldsymbol{H}, \boldsymbol{X}_B) \tag{3.9}$$

概念モデルの場合には, 理想的なトラス構造を想定していることから部材に作用する力は軸力のみとなる. したがって, 部材(可変長部材)の弾性変形は軸方向に限定され, 機構運動による部材長変化と幾何学的に等価である. 式(3.9)の弾性変形を考慮した機構関係は, 2.2.2節で導いた, 変形を考慮しない場合の機構関係式(2.4)において$\boldsymbol{X}$を$\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{L}$を$\boldsymbol{H}$と置き換えたものとして得られる. 式(3.9)の$\boldsymbol{R}$についてのマクローリン展開を考えれば, $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{O}$においては$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{L}$, $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{X}$であるから

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{X} + \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \boldsymbol{H}}\right|_{\boldsymbol{H}=\boldsymbol{L}} \boldsymbol{R} + \cdots \tag{3.10}$$

となり, 弾性変形の2次以上の項を無視すると,

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{X} + \boldsymbol{J}^{DH} \boldsymbol{R} \tag{3.11}$$

となる. ここで,

$$\boldsymbol{J}^{DH} = \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \boldsymbol{H}}\right|_{\boldsymbol{H}=\boldsymbol{L}} \tag{3.12}$$

は, 弾性変形を考慮した機構関係式のヤコビ行列であり, 式(3.9)と(2.4)とが等価であり, $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{O}$においては$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{L}$であることから, 概念モデルの場合には式(2.7)の$\boldsymbol{J}^{XL}$に等しいものとなる. 式(3.11)より,

$$\boldsymbol{J}^{DH} \boldsymbol{R} = \boldsymbol{D} - \boldsymbol{X} = \boldsymbol{U} \tag{3.13}$$

となるから,

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{J}^{DH^{-1}} \boldsymbol{U} \tag{3.14}$$

が成り立つ. 式(3.14)を式(3.6)に代入すれば,

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} (\boldsymbol{J}^{DH^{-1}} \boldsymbol{U}) \boldsymbol{K}^R \boldsymbol{J}^{DH^{-1}} \boldsymbol{U} \\ &= \frac{1}{2} \boldsymbol{U}^T (\boldsymbol{J}^{DH^{-1}})^T \boldsymbol{K}^R \boldsymbol{J}^{DH^{-1}} \boldsymbol{U} \\ &= \frac{1}{2} \boldsymbol{U}^T \boldsymbol{K} \boldsymbol{U} \end{aligned} \tag{3.15}$$

として, ひずみエネルギを節点変位$\boldsymbol{U}$を用いて表すことができる. ここで,

$$\boldsymbol{K} = (\boldsymbol{J}^{DH^{-1}})^T \boldsymbol{K}^R \boldsymbol{J}^{DH^{-1}} \tag{3.16}$$

は節点変位に対応する適応トラスの剛性マトリクスである. 適応トラスのある姿勢(形態)におけるヤコビ行列$\boldsymbol{J}^{DH}$が, マトリクス構造解析手法における, 部材座標系から全体座標系への座標変換行列に相当する.

適応トラスの運動は幾何的な形態の変化をともなうため, その運動方程式を導出するためには, 機構運動によるエネルギの変化についても考慮

する必要がある. 機構運動によるひずみエネルギの増分は, 式 (3.6)-(3.8) より,

$$\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}} = \left[\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}_1}, \cdots, \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}_M}\right] \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}_n} &= \frac{1}{2}\frac{\partial(\boldsymbol{R}_n^T \boldsymbol{K}^R{}_n \boldsymbol{R}_n)}{\partial \boldsymbol{L}_n} \\ &= \left[-\frac{EA}{l_{n1}^2} r_{n1}^2, -\frac{EA}{l_{n2}^2} r_{n2}^2, -\frac{EA}{l_{n3}^2} r_{n3}^2\right]\end{aligned} \tag{3.18}$$

として得られ, 節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$について表せば,

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{X}} &= \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}}\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \boldsymbol{X}} \\ &= \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}} \boldsymbol{J}^{LX}\end{aligned} \tag{3.19}$$

となる. ここで,

$$\boldsymbol{J}^{LX} = \boldsymbol{J}^{XL^{-1}} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{X}}{\partial \boldsymbol{L}}\right)^{-1} \tag{3.20}$$

であり, 式 (2.7) より求めることができる.

(2) 運動エネルギ

運動エネルギの定式化に際しては, 可変長部材における速度分布の記述のため, 伸縮機構を考慮した可変長部材のモデルを構築することが必要となる. 最も単純なモデル化としては, 部材全体の一様な伸縮を想定したモデル[114]が挙げられるが, ここでは, 可変長部材の機械的な実現のための機構を考え, 直動リンク機構をモデル化したもの (図 3.1) を用いる. 可変長部材 ni の運動エネルギ T_{ni}は, 図 3.1に示す座標系 C_{ni}を参照すれば[1], 次のような手順で求められる.

[1] ここで用いる座標系 C_{ni}は, 時間とともに変化する部材 ni の位置のみに関係するものであり, 部材 ni に固定されているものではない. 全体座標系 (静止座標系) に対する座標系 C_{ni}の速度あるいは加速度は常にゼロであり, 座標系 C_{ni}で表した運動エネルギは全体座標系で表した運動エネルギに等しいものとなる.

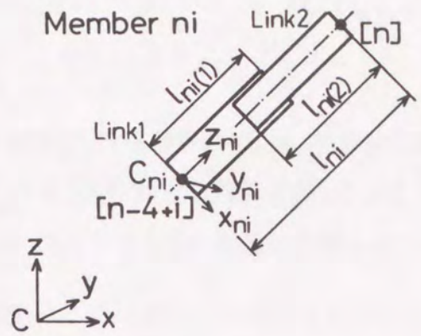


図 3.1: 可変長部材のモデルと座標系 C_{ni}

部材 ni のリンク k $(k=1,2)$ の速度分布

$$\dot{\boldsymbol{d}}_{ni(k)}(\xi) = \boldsymbol{a}^U_{ni(k)}(\xi)\dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni} + \boldsymbol{a}^X_{ni(k)}(\xi)\dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni} \tag{3.21}$$

を考える. ここで, $\dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni}$および$\dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni}$は部材 ni の両端の速度に対する弾性変形および剛体運動の寄与分を座標系 C_{ni}で表したもので,

$$\dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{n-4+i} \\ \dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{n} \end{bmatrix} \qquad \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{n-4+i} \\ \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{n} \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

であり, $\boldsymbol{a}^U_{ni(k)}$および$\boldsymbol{a}^X_{ni(k)}$は, 弾性変形および剛体運動による部材 ni のリンク kの, 座標系 C_{ni}を参照した速度分布を表すためのξ $(0 \le \xi \le 1)$ をパラメータとする形状関数である. 部材の弾性変形について図 3.2(a) に示す線形の速度分布を想定すれば, 部材長さ l_{ni}に対応するリンク kの有効長さ $l_{ni(k)}$の比

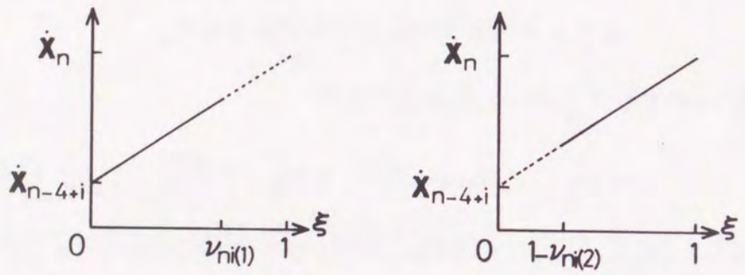
$$\nu_{ni(k)} = l_{ni(k)}/l_{ni} \tag{3.23}$$

を用いて, $\boldsymbol{a}^U_{ni(k)}$は次のように表される.

$$\boldsymbol{a}^U_{ni(1)} = \begin{bmatrix} 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

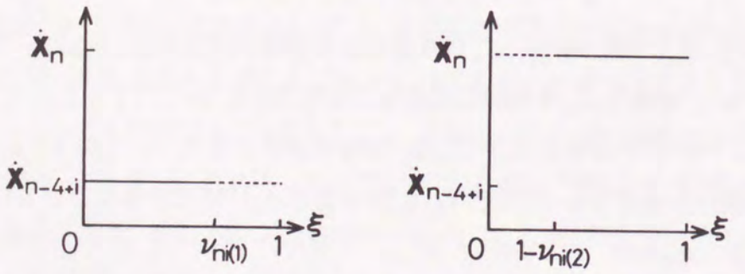
$$\boldsymbol{a}^{U}_{ni(2)} = \begin{bmatrix} \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 \\ 0 & \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 \\ 0 & 0 & \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

機構運動による速度分布は, 軸方向 (座標系 C_{ni}における z軸方向) には図 3.2(b) に示す分布となり, 軸と垂直な方向 (座標系 C_{ni}における x, y軸方向) には図 3.2(a) に示す線形の速度分布となるため, $\boldsymbol{a}^{X}_{ni(k)}$は, 次式のように表される.



リンク 1　　リンク 2

(a) 線形速度分布の場合



リンク 1　　リンク 2

(b) 剛体運動の場合

図 3.2: 部材の速度分布を表す形状関数

$$\boldsymbol{a}^{X}_{ni(1)} = \begin{bmatrix} 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

$$\boldsymbol{a}^{X}_{ni(2)} = \begin{bmatrix} \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 \\ 0 & \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

式 (3.21)-(3.27) を用いれば, 部材 ni の運動エネルギ T_{ni}は

$$\begin{aligned} T_{ni} &= \sum_{k=1}^{2} \int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \dot{\boldsymbol{d}}^{T}_{ni(k)} \dot{\boldsymbol{d}}_{ni(k)} d\xi \\ &= \sum_{k=1}^{2} \int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} (\boldsymbol{a}^{U}_{ni(k)} \dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni} + \boldsymbol{a}^{X}_{ni(k)} \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni})^{T} \\ &\qquad (\boldsymbol{a}^{U}_{ni(k)} \dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni} + \boldsymbol{a}^{X}_{ni(k)} \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni}) d\xi \end{aligned} \tag{3.28}$$

となる. ここで, ρは部材を構成する材料の密度であり, $A_{ni(k)}$は部材 ni のリンク $k\,(k=1,2)$ の断面積を表す. 式 (3.28) より, 次式が得られる.

$$\begin{aligned} T_{ni} &= \frac{1}{2} (\dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni})^{T} \boldsymbol{M}^{UU(ni)}_{ni} \dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni} + \frac{1}{2} (\dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni})^{T} \boldsymbol{M}^{XX(ni)}_{ni} \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni} \\ &\quad + (\dot{\boldsymbol{U}}^{(ni)}_{ni})^{T} \boldsymbol{M}^{UX(ni)}_{ni} \dot{\boldsymbol{X}}^{(ni)}_{ni} \end{aligned} \tag{3.29}$$

ここで, $\boldsymbol{M}^{UU(ni)}_{ni}$, $\boldsymbol{M}^{XX(ni)}_{ni}$, $\boldsymbol{M}^{UX(ni)}_{ni}$は, 座標系 C_{ni}を参照した部材 ni の弾性変形, 剛体運動およびそれらの連成項に対応する慣性マトリクスであり, 部材 ni のリンク kについての慣性マトリクス

$$\boldsymbol{M}^{UU\ (ni)}_{ni(k)} = \mu_{ni(k)} \int_0^1 \boldsymbol{a}^{U}_{ni(k)}{}^{T} \boldsymbol{a}^{U}_{ni(k)} d\xi \tag{3.30}$$

$$\boldsymbol{M}^{XX\ (ni)}_{ni(k)} = \mu_{ni(k)} \int_0^1 \boldsymbol{a}^{X}_{ni(k)}{}^{T} \boldsymbol{a}^{X}_{ni(k)} d\xi \tag{3.31}$$

$$\boldsymbol{M}^{UX\ (ni)}_{ni(k)} = \mu_{ni(k)} \int_0^1 \boldsymbol{a}^{U}_{ni(k)}{}^{T} \boldsymbol{a}^{X}_{ni(k)} d\xi \tag{3.32}$$

を用いて,

$$\boldsymbol{M}_{ni}^{UU(ni)} = \sum_{k=1}^{2} \boldsymbol{M}_{ni(k)}^{UU\ (ni)} \tag{3.33}$$

$$\boldsymbol{M}_{ni}^{XX(ni)} = \sum_{k=1}^{2} \boldsymbol{M}_{ni(k)}^{XX\ (ni)} \tag{3.34}$$

$$\boldsymbol{M}_{ni}^{UX(ni)} = \sum_{k=1}^{2} \boldsymbol{M}_{ni(k)}^{UX\ (ni)} \tag{3.35}$$

として得られる. ただし,

$$\mu_{ni(k)} = \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \tag{3.36}$$

はリンクの質量である.

部材 ni の運動エネルギを表す式 (3.29) を全体座標系 Cに変換する. 部材 ni 両端の速度の全体座標系 Cから局所座標系 C_{ni}への座標変換式は, 付録 A.4節を参照すれば,

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{ni}^{(ni)} = \boldsymbol{N}_{ni}\dot{\boldsymbol{U}}_{ni} \tag{3.37}$$

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{ni}^{(ni)} = \boldsymbol{N}_{ni}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni} \tag{3.38}$$

と表される. 式 (3.29) に (3.37), (3.38) を代入して整理すれば, 全体座標系 Cで記述した部材 ni の運動エネルギが, 全体座標系における慣性マトリクス

$$\boldsymbol{M}_{ni}^{UU} = \boldsymbol{N}_{ni}^{T}\boldsymbol{M}_{ni}^{UU(ni)}\boldsymbol{N}_{ni} \tag{3.39}$$

$$\boldsymbol{M}_{ni}^{XX} = \boldsymbol{N}_{ni}^{T}\boldsymbol{M}_{ni}^{XX(ni)}\boldsymbol{N}_{ni} \tag{3.40}$$

$$\boldsymbol{M}_{ni}^{UX} = \boldsymbol{N}_{ni}^{T}\boldsymbol{M}_{ni}^{UX(ni)}\boldsymbol{N}_{ni} \tag{3.41}$$

を用いて

$$T_{ni} = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{U}}_{ni}^{T}\boldsymbol{M}_{ni}^{UU}\dot{\boldsymbol{U}}_{ni} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni}^{T}\boldsymbol{M}_{ni}^{XX}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni} + \dot{\boldsymbol{U}}_{ni}^{T}\boldsymbol{M}_{ni}^{UX}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni} \tag{3.42}$$

として表せる. 式 (3.42) を適応トラス全体 ($n = 1, \cdots, M; i = 1, 2, 3$) についてまとめれば, 次式が得られる.

$$T = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{U}}^{T}\boldsymbol{M}^{UU}\dot{\boldsymbol{U}} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{X}}^{T}\boldsymbol{M}^{XX}\dot{\boldsymbol{X}} + \dot{\boldsymbol{U}}^{T}\boldsymbol{M}^{UX}\dot{\boldsymbol{X}} \tag{3.43}$$

ここで, $\boldsymbol{M}^{UU}$, $\boldsymbol{M}^{XX}$, $\boldsymbol{M}^{UX}$は適応トラス全体についての慣性マトリクスであり, それぞれ弾性変形, 剛体運動およびそれらの連成項に対応する.

ひずみエネルギの場合と同様に, 機構運動による運動エネルギの変化について考察する. これは, 機構運動によって式 (3.23) の$\nu_{ni(k)}$が変化する場合に必要となる. 運動エネルギと部材長さの間のヤコビ行列は

$$\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{L}} = \left[\frac{\partial T_{11}}{\partial l_{11}}, \cdots, \frac{\partial T_{13}}{\partial l_{13}}, \frac{\partial T_{21}}{\partial l_{21}}, \cdots\cdots, \frac{\partial T_{M3}}{\partial l_{M3}}\right] \tag{3.44}$$

と表される. ここで, 式 (3.42) より,

$$\frac{\partial T_{ni}}{\partial l_{ni}} = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{U}}_{ni}^{T}\frac{\partial \boldsymbol{M}_{ni}^{UU}}{\partial l_{ni}}\dot{\boldsymbol{U}}_{ni} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni}^{T}\frac{\partial \boldsymbol{M}_{ni}^{XX}}{\partial l_{ni}}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni} + \dot{\boldsymbol{X}}_{ni}^{T}\frac{\partial \boldsymbol{M}_{ni}^{UX}}{\partial l_{ni}}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni} \tag{3.45}$$

であり, さらに,

$$\frac{\partial \boldsymbol{M}_{ni}^{UU}}{\partial l_{ni}} = \boldsymbol{N}_{ni}^{T}\frac{\partial \boldsymbol{M}_{ni}^{UU(ni)}}{\partial l_{ni}}\boldsymbol{N}_{ni} \tag{3.46}$$

である ($\boldsymbol{M}_{ni}^{XX}$, $\boldsymbol{M}_{ni}^{UX}$についても同様). 節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$について表せば, ひずみエネルギの場合と同様に

$$\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{X}} = \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{L}}\boldsymbol{J}^{LX} \tag{3.47}$$

となる.

(3) ポテンシャルエネルギ

適応トラスが重力などのポテンシャル場に置かれた場合には, ポテンシャルエネルギの影響を考慮する必要がある. ここでは, 一様な重力場の下でのポテンシャルエネルギについて考える.

運動エネルギの場合と同様に, 図3.1に示した直動リンク機構を想定する. 部材 ni のリンク kの位置の分布

$$\boldsymbol{d}_{ni(k)}(\xi) = \boldsymbol{b}^U_{ni(k)}(\xi)\boldsymbol{U}_{ni} + \boldsymbol{b}^X_{ni(k)}(\xi)\boldsymbol{X}_{ni} \tag{3.48}$$

を考える. ここで, $\boldsymbol{U}_{ni}$および$\boldsymbol{X}_{ni}$は部材 ni の両端の位置

$$\boldsymbol{U}_{ni} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{n-4+i} \\ \boldsymbol{U}_n \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{X}_{ni} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{n-4+i} \\ \boldsymbol{X}_n \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

であり, $\boldsymbol{b}^U_{ni(k)}$および$\boldsymbol{b}^X_{ni(k)}$は部材 ni のリンク kの弾性運動および剛体運動に対応する位置の分布を表すためのξ $(0 \le \xi \le 1)$ をパラメータとする形状関数である. リンクの断面積が一様であると仮定すれば,

$$\boldsymbol{b}^U_{ni(k)} = \boldsymbol{b}^X_{ni(k)} = \boldsymbol{b}_{ni(k)} \qquad (k = 1, 2) \tag{3.50}$$

$$\boldsymbol{b}_{ni(1)} = \begin{bmatrix} 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu_{ni(1)}\xi & 0 & 0 & \nu_{ni(1)}\xi \end{bmatrix} \tag{3.51}$$

$$\boldsymbol{b}_{ni(2)} = \begin{bmatrix} \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 \\ 0 & \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 \\ 0 & 0 & \nu_{ni(2)}(1-\xi) & 0 & 0 & 1-\nu_{ni(2)}(1-\xi) \end{bmatrix} \tag{3.52}$$

となり, 式 (3.48)-(3.52) を用いて, 部材 ni のポテンシャルエネルギ P_{ni} は次のように表される.

$$\begin{aligned} P_{ni} &= \sum_{k=1}^{2} \int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{d}_{ni(k)}(\xi) d\xi \\ &= \sum_{k=1}^{2} \int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \boldsymbol{g}^T (\boldsymbol{b}^U_{ni(k)}\boldsymbol{U}_{ni} + \boldsymbol{b}^X_{ni(k)}\boldsymbol{X}_{ni}) d\xi \end{aligned} \tag{3.53}$$

ここで, $\boldsymbol{g}$はポテンシャル場の加速度ベクトルであり, 地表の重力場を想定する場合には, $\boldsymbol{g} = [0, 0, -9.8]^T$となる. 式 (3.50) を考慮して部材 ni における両端節点での位置ベクトル

$$\boldsymbol{D}_{ni} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_{n-4+i} \\ \boldsymbol{D}_n \end{bmatrix} \tag{3.54}$$

で整理すると, 式 (3.53) は

$$\begin{aligned} P_{ni} &= \sum_{k=1}^{2} \int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{b}_{ni(k)} \boldsymbol{D}_{ni} d\xi \\ &= \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{V}_{ni} \boldsymbol{D}_{ni} \end{aligned} \tag{3.55}$$

となる. ここで,

$$\boldsymbol{V}_{ni} = \sum_{k=1}^{2} \int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \boldsymbol{b}_{ni(k)} d\xi \tag{3.56}$$

である. 式 (3.55) を適応トラス全体についてまとめれば,

$$\begin{aligned} P &= \sum_{n=1}^{M} \sum_{i=1}^{3} P_{ni} \\ &= \sum_{n=1}^{M} \sum_{i=1}^{3} \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{V}_{ni} \boldsymbol{D}_{ni} \end{aligned} \tag{3.57}$$

となり, 適応トラス全体の変形を考慮した節点位置ベクトル$\boldsymbol{D}$を用いれば, 次のような形式で表すことができる.

$$P = \boldsymbol{F}^T \boldsymbol{D} \tag{3.58}$$

ここで, $\boldsymbol{F}$は全節点ポテンシャル力ベクトルを表す.

3.2.3 Lagrange の運動方程式

前節までに導いたエネルギ, すなわちひずみエネルギ

$$U = \frac{1}{2}\boldsymbol{U}^T \boldsymbol{K} \boldsymbol{U} \tag{3.15}$$

運動エネルギ

$$T = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{U}}^T \boldsymbol{M}^{UU} \dot{\boldsymbol{U}} + \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{X}}^T \boldsymbol{M}^{XX} \dot{\boldsymbol{X}} + \dot{\boldsymbol{U}}^T \boldsymbol{M}^{UX} \dot{\boldsymbol{X}} \tag{3.43}$$

ポテンシャルエネルギ

$$P = \boldsymbol{F}^T \boldsymbol{D} \tag{3.58}$$

を用いて適応トラスのLagrange関数を次のように構成する.

$$\mathcal{L} = T - U + P + A + \boldsymbol{\lambda}^T(\boldsymbol{D} - \boldsymbol{X} - \boldsymbol{U}) \tag{3.59}$$

ここで, $\boldsymbol{\lambda}$は$\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{U}$の間の関係式 (3.1) を制約として取り扱うためのLagrange乗数ベクトルであり, A は機構運動のために可変長部材に取付けたアクチュエータのなす仕事である. 式 (3.59) より, Lagrangeの運動方程式

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{q}} = \boldsymbol{O} \tag{3.60}$$

を導く. 一般化座標$\boldsymbol{q}$として, $\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{U}$および$\boldsymbol{\lambda}$ を用いれば, 次式のようになる.

$$-\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{D}} - \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{O} \tag{3.61}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{X}}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{X}} + \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{X}} + \boldsymbol{\lambda} = \frac{\partial A}{\partial \boldsymbol{X}} \tag{3.62}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\boldsymbol{U}}}\right) + \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{U}} + \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{O} \tag{3.63}$$

$$\boldsymbol{D} - \boldsymbol{X} - \boldsymbol{U} = \boldsymbol{O} \tag{3.64}$$

式 (3.61) および (3.58) より,

$$\boldsymbol{\lambda} = -\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{D}} = -\boldsymbol{F}^T \tag{3.65}$$

となる. 式 (3.62) より,

$$\boldsymbol{M}^{XX}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{M}^{UX^T}\ddot{\boldsymbol{U}} - \left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{X}}\right)^T + \left(\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{X}}\right)^T + \boldsymbol{\lambda}^T = \left(\frac{\partial A}{\partial \boldsymbol{X}}\right)^T \tag{3.66}$$

が得られ, また, 式 (3.63) より,

$$\boldsymbol{M}^{UU}\ddot{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{M}^{UX}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{U} + \boldsymbol{\lambda}^T = \boldsymbol{O} \tag{3.67}$$

が得られる. 式 (3.65) を式 (3.66) および (3.67) に代入し, 式 (3.19) および (3.47) を考慮して整理すれば, 式 (3.61) と合わせて適応トラスの運動方程式が得られる.

$$\boldsymbol{M}^{XX}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{M}^{XU}\ddot{\boldsymbol{U}} - \boldsymbol{J}^{LX^T}\left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{L}}\right)^T + \boldsymbol{J}^{LX^T}\left(\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}}\right)^T - \boldsymbol{F} = \left(\frac{\partial A}{\partial \boldsymbol{X}}\right)^T \tag{3.68}$$

$$\boldsymbol{M}^{UU}\ddot{\boldsymbol{U}} + \boldsymbol{M}^{UX}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{U} - \boldsymbol{F} = \boldsymbol{O} \tag{3.69}$$

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{X} + \boldsymbol{U} \tag{3.70}$$

ただし,

$$\boldsymbol{M}^{XU} = \boldsymbol{M}^{UX^T} \tag{3.71}$$

である.

3.3 実モデルへの定式化の拡張

3.3.1 運動を記述する変数

適応トラスの実モデルの運動の記述に際しては, 節点部のジョイント回転中心間のオフセットを考慮する必要がある. 2.3節で述べた実モデルの機構関係の定式化を参照し, 節点部の位置に加えて方向を用いて運動を記述する. 概念モデルの場合に用いた$\boldsymbol{X}_n$, $\boldsymbol{U}_n$, $\boldsymbol{D}_n$などの節点位置に関する変数は, 実モデルにおいては節点部の代表点の位置に関する変数として用いる. また, 実モデルにおいては, 節点部を持つ縦部材$n1$に, 軸力に加えて曲げとねじりのモーメントが作用するため, 図3.3に示すように, 変形を考える際には縦部材のたわみおよびねじれを考慮する必要がある. 本論文では, これらの変形を縦部材$n1$に固定されている節点座標系C_n(図2.4) を参照したたわみ角y_{n_x}, y_{n_y}およびねじれ角y_{n_z}を用いて表す. これは, 弾性変形による部材長変化r_{ni}が, 部材に固定した座標系を参

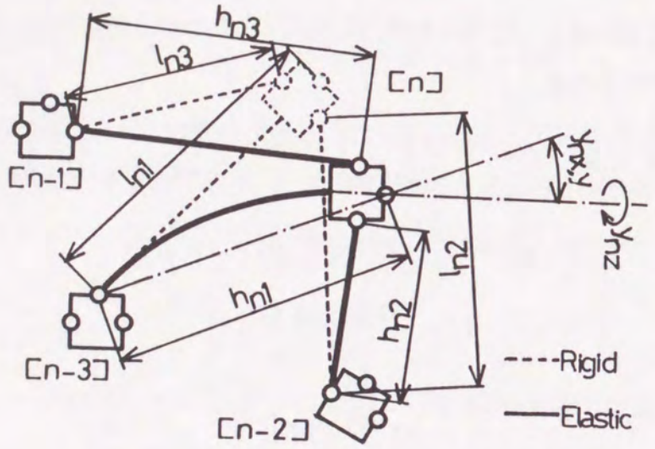


図 3.3: 実モデルのトラスモジュールの弾性変形

照した軸方向変位にほかならないことに対応している. これらを取り扱うため, 実モデルの運動の記述においては, 概念モデルの場合に用いた変数に加え, 節点ブロックの姿勢を表す変数,

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\Theta}_n &= [\theta_{nx}, \theta_{ny}, \theta_{nz}]^T && \text{剛体運動に基づく節点部姿勢角}\\
\boldsymbol{\Psi}_n &= [\psi_{nx}, \psi_{ny}, \psi_{nz}]^T && \text{弾性変形による姿勢角変化}\\
\boldsymbol{\Phi}_n &= [\phi_{nx}, \phi_{ny}, \phi_{nz}]^T && \text{変形を考慮した姿勢角}
\end{aligned}$$

縦部材のたわみ角ならびにねじれ角を表す変数

$$\boldsymbol{Y}_n = [y_{nx}, y_{ny}, y_{nz}]^T \quad \text{節点座標系 } C_n\text{を参照した縦部材 } n1 \text{ の弾性変形によるたわみ角 } y_{nx},\ y_{ny} \text{ およびねじれ角 } y_{nz}$$

を定義する. 概念モデルの場合の式 (3.1), (3.2) と同様に, 次に示す関係が成り立つ.

$$\boldsymbol{\Phi}_n = \boldsymbol{\Theta}_n + \boldsymbol{\Psi}_n \tag{3.72}$$

$$\boldsymbol{Y}_n = \boldsymbol{O}_3 + \boldsymbol{Y}_n \tag{3.73}$$

式 (3.73) は, 適応トラスの縦部材のたわみ角およびねじれ角は, 縦部材 $n1$ に固定されている節点座標系 C_nを参照したものであり, 剛体運動による寄与が存在せず, 弾性変形による寄与分 ($\boldsymbol{Y}_n$) のみで決まることを示している.

ここで, 節点部に関する量を記述する変数と部材に関する量を記述する変数とをそれぞれまとめた, 以下のような変数を導入する.

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{D}_n^* &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_n \\ \boldsymbol{\Phi}_n \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{X}_n^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_n \\ \boldsymbol{\Theta}_n \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{U}_n^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_n \\ \boldsymbol{\Psi}_n \end{bmatrix}\\
\boldsymbol{H}_n^* &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_n \\ \boldsymbol{Y}_n \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{L}_n^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_n \\ \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{R}_n^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_n \\ \boldsymbol{Y}_n \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.74}$$

これらの変数を用いれば, 式 (3.1), (3.2), (3.72), (3.73) の関係は, 次式のようにまとめることができる.

$$\boldsymbol{D}_n^* = \boldsymbol{X}_n^* + \boldsymbol{U}_n^* \tag{3.75}$$

$$\boldsymbol{H}_n^* = \boldsymbol{L}_n^* + \boldsymbol{R}_n^* \tag{3.76}$$

また, 概念モデルの場合と同様に, 適応トラス全体についてまとめた変数

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{X}^* &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{X}_M^* \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{U}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_1^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{U}_M^* \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{D}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_1^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{D}_M^* \end{bmatrix}\\
\boldsymbol{L}^* &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_1^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{L}_M^* \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{R}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_1^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{R}_M^* \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{H}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_1^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{H}_M^* \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.77}$$

を必要に応じて用いることとする.

3.3.2 エネルギの定式化

(1) ひずみエネルギ

3.2.2節と同様の手順にしたがって, ひずみエネルギの定式化を行う. 概念モデルの場合には部材の軸方向の変形のみを考慮すればよく, それらを単純な軸剛性要素としてひずみエネルギを定式化することができたが, 実モデルの場合には縦部材 $n1$ についてはたわみとねじれを考慮する必要があるため, 縦部材 $n1$ をラーメン要素[74][102], 横あるいは斜め部材 $n2$, $n3$ をトラス要素としてひずみエネルギの定式化を行う.

部材 ni のひずみエネルギ U_{ni}は, 横あるいは斜め部材 $n2$, $n3$ については概念モデルの場合と同様に式 (3.4) により表され, 縦部材 $n1$ の場合には弾性変形による部材長変化 r_{n1}に加えてたわみ y_{n_x}, y_{n_y}およびねじれ y_{n_z}を考慮して, 次のように表される.

$$U_{n1} = \frac{1}{2}\left(\frac{EA}{l_{n1}}{r_{n1}}^2 + \frac{4EI}{l_{n1}}{y_{n_x}}^2 + \frac{4EI}{l_{n1}}{y_{n_y}}^2 + \frac{GJ}{l_{n1}}{y_{n_z}}^2\right) \tag{3.78}$$

ここで, EIおよび GJは縦部材の曲げ剛性およびねじり剛性である. 適応トラス全体のひずみエネルギ Uは

$$U = \sum_{n=1}^{M}\sum_{i=1}^{3} U_{ni} \tag{3.79}$$

となり, 縦部材のたわみおよびねじれを含む, 部材の弾性変形を表すベクトル$\boldsymbol{R}^*$を用いて次式のようにまとめることができる.

$$U = \frac{1}{2}(\boldsymbol{R}^*)^T \boldsymbol{K}^{R^*}\boldsymbol{R}^* \tag{3.80}$$

ここで, $\boldsymbol{K}^{R^*}$は適応トラスの実モデルの部材の弾性変形に対応する剛性マトリクス

$$\boldsymbol{K}^{R^*} = \mathrm{diag}[\boldsymbol{K}_1^{R^*}, \cdots, \boldsymbol{K}_M^{R^*}] \tag{3.81}$$

$$\boldsymbol{K}_n^{R^*} = \mathrm{diag}\left[\frac{EA}{l_{n1}}, \frac{EA}{l_{n2}}, \frac{EA}{l_{n3}}, \frac{4EI}{l_{n1}}, \frac{4EI}{l_{n1}}, \frac{GJ}{l_{n1}}\right] \tag{3.82}$$

である.

式 (3.80)–(3.82) と概念モデルの場合の式 (3.6)–(3.8) とを比較することにより, 弾性変形を考慮した適応トラスの機構関係

$$\boldsymbol{D}^* = \boldsymbol{D}^*(\boldsymbol{H}^*, \boldsymbol{X}_B^*) \tag{3.83}$$

を考えれば, 概念モデルの場合の式 (3.10)–(3.16) の議論がそのまま適用できることがわかる. ここで,

$$\boldsymbol{X}_B^* = [{\boldsymbol{X}_{-2}^*}^T, {\boldsymbol{X}_{-1}^*}^T, \boldsymbol{X}_0^{*T}]^T \tag{3.84}$$

である. ただし, 実モデルの場合には, 弾性変形を取り扱う際に, 2.3.2節では考慮しなかった縦部材 $n1$ のたわみおよびねじれを考慮する必要があるため, 式 (3.83) は, 2.3.2節で導いた機構関係式 (2.25) とは基本的に異なるものとなることに留意しなければならない. 実モデルの場合の, 変形を考慮した機構関係式およびその増分関係については付録 A.5節で述べる.

拡張された節点変位ベクトル$\boldsymbol{U}^*$について表した適応トラスの実モデルのひずみエネルギは, 変形を考慮した機構関係式に基づくヤコビ行列

$$\boldsymbol{J}^{DH^*} = \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}^*}{\partial \boldsymbol{H}^*}\right|_{\boldsymbol{H}^*=\boldsymbol{L}^*} \tag{3.85}$$

を用いて,

$$U = \frac{1}{2}(\boldsymbol{U}^*)^T \boldsymbol{K}^*\boldsymbol{U}^* \tag{3.86}$$

$$\boldsymbol{K}^* = (\boldsymbol{J}^{DH^{*-1}})^T \boldsymbol{K}^{R^*}\boldsymbol{J}^{DH^{*-1}} \tag{3.87}$$

となる. ここで, $\boldsymbol{K}^*$が拡張された節点変位ベクトル$\boldsymbol{U}^*$に対応する適応トラスの実モデルの剛性マトリクスである.

機構運動によるひずみエネルギの増分は, 概念モデルの場合と同様に式 (3.80)–(3.82) より,

$$\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}^*} = \left[\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}_1^*}, \cdots, \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}_M^*}\right] \tag{3.88}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}_n^*} = \frac{1}{2}\frac{\partial(\boldsymbol{R}_n^{*T}\boldsymbol{K}_n^{R^*}\boldsymbol{R}_n^*)}{\partial \boldsymbol{L}_n^*} = \left[\left(\frac{EA}{l_{n1}^2}r_{n1}^2 - \frac{4EI}{l_{n1}^2}y_{n_x}^2 - \frac{4EI}{l_{n1}^2}y_{n_y}^2 - \frac{GJ}{l_{n1}^2}y_{n_z}^2\right), -\frac{EA}{l_{n2}^2}r_{n2}^2,\ -\frac{EA}{l_{n3}^2}r_{n3}^2,\ 0,\ 0,\ 0\right] \quad (3.89)$$

として得られ, 拡張された節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}^*$について表せば,

$$\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{X}^*} = \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}^*}\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \boldsymbol{X}^*} = \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}^*}\boldsymbol{J}^{LX^*} \quad (3.90)$$

となる. ここで,

$$\boldsymbol{J}^{LX^*} = (\boldsymbol{J}^{XL^*})^{-1} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{X}^*}{\partial \boldsymbol{L}^*}\right)^{-1} \quad (3.91)$$

であり, 付録A.5節で述べる変形を考慮した機構関係のヤコビ行列より求めることができる.

(2) 運動エネルギ

可変長部材niの運動エネルギについては, 概念モデルの場合に式(3.22)で定義した, 部材ni両端の速度に対する弾性変形および剛体運動の寄与分を座標系C_{ni}で表した$\dot{\boldsymbol{U}}_{ni}^{(ni)}$および$\dot{\boldsymbol{X}}_{ni}^{(ni)}$を, 節点オフセットを考慮して次のように定義しなおすことにより, 概念モデルの場合の式(3.28)–(3.42)の定式化が, 実モデルの場合にもそのまま適用できる.

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{ni}^{(ni)} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{U}}_{n-4+i,4-i}^{(ni)} \\ \dot{\boldsymbol{U}}_{n,-4+i}^{(ni)} \end{bmatrix} \qquad \dot{\boldsymbol{X}}_{ni}^{(ni)} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{X}}_{n-4+i,4-i}^{(ni)} \\ \dot{\boldsymbol{X}}_{n,-4+i}^{(ni)} \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

したがって, 全体座標系Cで表した可変長部材niの慣性マトリクス$\boldsymbol{M}_{ni}^{UU}$, $\boldsymbol{M}_{ni}^{XX}$, $\boldsymbol{M}_{ni}^{UX}$は概念モデルの場合と同じものを用いることができる. 節点オフセットについては次のように考慮する.

剛体運動に基づくジョイントn,aの位置$\boldsymbol{X}_{n,a}$および変形を考慮したジョイントn,aの位置$\boldsymbol{D}_{n,a}$は, 式(2.11)および(2.13)を参照して,

$$\boldsymbol{X}_{n,a} = \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)} + \boldsymbol{X}_n \quad (3.93)$$

$$\boldsymbol{D}_{n,a} = \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Phi}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)} + \boldsymbol{D}_n \quad (3.94)$$

として表される. 式(3.94)について, 式(3.1)および(3.72)に留意して$\boldsymbol{X}_n$, $\boldsymbol{\Theta}_n$についてのテイラー展開を行い, 1次の微少量まで採用すれば,

$$\boldsymbol{D}_{n,a} = \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\Theta}_n}(\mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)})\boldsymbol{\Psi}_n + \boldsymbol{X}_n + \boldsymbol{U}_n \quad (3.95)$$

となる. 式(3.95)および(3.93)より,

$$\boldsymbol{U}_{n,a} = \boldsymbol{D}_{n,a} - \boldsymbol{X}_{n,a} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\Theta}_n}(\mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)})\boldsymbol{\Psi}_n + \boldsymbol{U}_n \quad (3.96)$$

が得られる. 式(3.96)および(3.93)の時間微分より,

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{n,a} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\Theta}_n}(\mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)})\dot{\boldsymbol{\Psi}}_n + \dot{\boldsymbol{U}}_n \quad (3.97)$$

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{n,a} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\Theta}_n}(\mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)})\dot{\boldsymbol{\Theta}}_n + \dot{\boldsymbol{X}}_n \quad (3.98)$$

として, $\dot{\boldsymbol{U}}_{n,a}$, $\dot{\boldsymbol{X}}_{n,a}$が得られる. ここで,

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\Theta}}(\mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}) = \left[\frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)}{\partial \theta_{nx}}\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}, \frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)}{\partial \theta_{ny}}\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}, \frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)}{\partial \theta_{nz}}\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)}\right] \quad (3.99)$$

$$\frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)}{\partial \theta_{nx}} = \mathbf{Rot}(z,\theta_{nz})\mathbf{Rot}(y,\theta_{ny})\frac{\partial \mathbf{Rot}(x,\theta_{nx})}{\partial \theta_{nx}} \quad (3.100)$$

$$\frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)}{\partial \theta_{ny}} = \mathbf{Rot}(z,\theta_{nz})\frac{\partial \mathbf{Rot}(y,\theta_{ny})}{\partial \theta_{ny}}\mathbf{Rot}(x,\theta_{nx}) \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)}{\partial \theta_{nz}} = \frac{\partial \mathbf{Rot}(z,\theta_{nz})}{\partial \theta_{nz}}\mathbf{Rot}(y,\theta_{ny})\mathbf{Rot}(x,\theta_{nx}) \quad (3.102)$$

はそれぞれ 3×3 の行列となる．次の 3×6 の変換行列

$$\boldsymbol{N}^{*}_{n,a}=\left[\boldsymbol{I}_3,\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\Theta}}(\mathbf{RPY}(\boldsymbol{\Theta}_n)\boldsymbol{S}^{(n)}_{n,a})\right] \tag{3.103}$$

を導入すれば，式 (3.97) および (3.98) は，$\boldsymbol{U}^{*}_{n}$および$\boldsymbol{X}^{*}_{n}$を用いて次のように整理できる．

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{n,a} = \boldsymbol{N}^{*}_{n,a}\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{n} \tag{3.104}$$

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{n,a} = \boldsymbol{N}^{*}_{n,a}\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{n} \tag{3.105}$$

したがって，全体座標系 Cで表した弾性変形および剛体運動による部材 ni の両端の速度への寄与$\dot{\boldsymbol{U}}_{ni}$および$\dot{\boldsymbol{X}}_{ni}$は，

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{U}}_{ni} &= \begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{U}}_{n-4+i,4-i}\\ \dot{\boldsymbol{U}}_{n,-4+i}\end{bmatrix}\\ &= \begin{bmatrix}\boldsymbol{N}^{*}_{n-4+i,4-i} & \boldsymbol{O}_{3\times6}\\ \boldsymbol{O}_{3\times6} & \boldsymbol{N}^{*}_{n,-4+i}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{n-4+i}\\ \dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{n}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{3.106}$$

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{X}}_{ni} &= \begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{X}}_{n-4+i,4-i}\\ \dot{\boldsymbol{X}}_{n,-4+i}\end{bmatrix}\\ &= \begin{bmatrix}\boldsymbol{N}^{*}_{n-4+i,4-i} & \boldsymbol{O}_{3\times6}\\ \boldsymbol{O}_{3\times6} & \boldsymbol{N}^{*}_{n,-4+i}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{n-4+i}\\ \dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{n}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{3.107}$$

となる．式 (3.106) および (3.107) を，部材 ni の運動エネルギを表す式 (3.42) に代入すれば，次式が得られる．

$$T_{ni}=\frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{ni})^{T}\boldsymbol{M}^{UU^{*}}_{ni}\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{ni}+\frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{ni})^{T}\boldsymbol{M}^{XX^{*}}_{ni}\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{ni}+(\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{ni})^{T}\boldsymbol{M}^{UX^{*}}_{ni}\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{ni} \tag{3.108}$$

ここで，ベクトル$\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{ni}$および$\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{ni}$は

$$\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{ni}=\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{n-4+i}\\ \dot{\boldsymbol{U}}^{*}_{n}\end{bmatrix}\qquad \dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{ni}=\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{n-4+i}\\ \dot{\boldsymbol{X}}^{*}_{n}\end{bmatrix} \tag{3.109}$$

であり，また，

$$\boldsymbol{M}^{UU^{*}}_{ni}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{N}^{*}_{n-4+i,4-i} & \boldsymbol{O}_{3\times6}\\ \boldsymbol{O}_{3\times6} & \boldsymbol{N}^{*}_{n,-4+i}\end{bmatrix}^{T}\boldsymbol{M}^{UU}_{ni}\begin{bmatrix}\boldsymbol{N}^{*}_{n-4+i,4-i} & \boldsymbol{O}_{3\times6}\\ \boldsymbol{O}_{3\times6} & \boldsymbol{N}^{*}_{n,-4+i}\end{bmatrix} \tag{3.110}$$

は，12×12 行列である．$\boldsymbol{M}^{XX^{*}}_{ni}$, $\boldsymbol{M}^{UX^{*}}_{ni}$についても同様である．式 (3.108) を適応トラス全体 ($n=1,\cdots,M;\ i=1,2,3$) についてまとめれば，

$$T=\frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{U}}^{*})^{T}\boldsymbol{M}^{UU^{*}}\dot{\boldsymbol{U}}^{*}+\frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{X}}^{*})^{T}\boldsymbol{M}^{XX^{*}}\dot{\boldsymbol{X}}^{*}+(\dot{\boldsymbol{U}}^{*})^{T}\boldsymbol{M}^{UX^{*}}\dot{\boldsymbol{X}}^{*} \tag{3.111}$$

が得られる．ここで，$\boldsymbol{M}^{UU^{*}}$, $\boldsymbol{M}^{XX^{*}}$, $\boldsymbol{M}^{UX^{*}}$は概念モデルの式 (3.43) における$\boldsymbol{M}^{UU}$, $\boldsymbol{M}^{XX}$, $\boldsymbol{M}^{UX}$に対応する適応トラス全体についての慣性マトリクスである．

実モデルの場合には，機構運動による運動エネルギの増分は

$$\frac{\partial T}{\partial\boldsymbol{L}^{*}}=\left[\frac{\partial T_{11}}{\partial l_{11}},\cdots,\frac{\partial T_{13}}{\partial l_{13}},\boldsymbol{O}^{T}_{3},\frac{\partial T_{21}}{\partial l_{21}},\cdots,\frac{\partial T_{23}}{\partial l_{23}},\boldsymbol{O}^{T}_{3},\cdots\cdots,\frac{\partial T_{M3}}{\partial l_{M3}},\boldsymbol{O}^{T}_{3}\right] \tag{3.112}$$

となる．$\partial T_{ni}/\partial l_{ni}$は，式 (3.45) より，式 (3.106) および (3.107) の関係を用いて$\boldsymbol{U}^{*}_{ni}$, $\boldsymbol{X}^{*}_{ni}$から求められる．拡張された節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}^{*}$について表せば，ひずみエネルギの場合と同様に

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial\boldsymbol{X}^{*}} &= \frac{\partial T}{\partial\boldsymbol{L}^{*}}\frac{\partial\boldsymbol{L}}{\partial\boldsymbol{X}^{*}}\\ &= \frac{\partial T}{\partial\boldsymbol{L}^{*}}\boldsymbol{J}^{LX^{*}}\end{aligned} \tag{3.113}$$

となる．

(3)　ポテンシャルエネルギ

節点オフセットを考慮した部材 ni のポテンシャルエネルギ P_{ni}は，

$$\boldsymbol{U}'_{ni}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{n-4+i,4-i}\\ \boldsymbol{U}_{n,-4+i}\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{X}'_{ni}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_{n-4+i,4-i}\\ \boldsymbol{X}_{n,-4+i}\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{D}'_{ni}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{D}_{n-4+i,4-i}\\ \boldsymbol{D}_{n,-4+i}\end{bmatrix} \tag{3.114}$$

と定義すれば, 概念モデルの場合の式 (3.50)–(3.55) を参照して

$$\begin{aligned} P_{ni} &= \sum_{k=1}^{2}\int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \boldsymbol{g}^T (\boldsymbol{b}^U_{ni(k)} \boldsymbol{U}'_{ni} + \boldsymbol{b}^X_{ni(k)} \boldsymbol{X}'_{ni}) d\xi \\ &= \sum_{k=1}^{2}\int_0^1 \rho A_{ni(k)} l_{ni(k)} \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{b}_{ni(k)} \boldsymbol{D}'_{ni} d\xi \\ &= \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{V}_{ni} \boldsymbol{D}'_{ni} \end{aligned} \tag{3.115}$$

として得られる. 式 (3.114) における$\boldsymbol{D}_{n,a}$は, 式 (3.94) の関係から$\boldsymbol{D}^*_n = [\boldsymbol{D}^T_n, \boldsymbol{\Phi}^T_n]^T$により定まるから, 適応トラスの実モデルのポテンシャルエネルギは

$$P = P(\boldsymbol{D}^*) \tag{3.116}$$

と書き表すことができる. これは, 概念モデルの場合の式 (3.58) のより一般的な形である. この場合のポテンシャル力ベクトルは

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{D}^*}\right)^T = \boldsymbol{F}^* \tag{3.117}$$

として得られる. ここで,

$$\boldsymbol{F}^* = [\boldsymbol{F}^{*T}_1, \cdots, \boldsymbol{F}^{*}{}^T_M]^T \tag{3.118}$$

$$\boldsymbol{F}^*_n = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_n \\ \boldsymbol{M}_n \end{bmatrix} \tag{3.119}$$

と書き表せば, $\boldsymbol{F}_n$および$\boldsymbol{M}_n$は, 全体座標系 Cを参照した, 節点部 n の代表点に作用する力およびモーメントを表す.

3.3.3 Lagrange の運動方程式の導出

前節までの導出により, 適応トラスの実モデルの運動記述に必要となるひずみエネルギ

$$U = \frac{1}{2}(\boldsymbol{U}^*)^T \boldsymbol{K}^* \boldsymbol{U}^* \tag{3.86}$$

運動エネルギ

$$T = \frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{U}}^*)^T \boldsymbol{M}^{UU^*} \dot{\boldsymbol{U}}^* + \frac{1}{2}(\dot{\boldsymbol{X}}^*)^T \boldsymbol{M}^{XX^*} \dot{\boldsymbol{X}}^* + (\dot{\boldsymbol{U}}^*)^T \boldsymbol{M}^{UX^*} \dot{\boldsymbol{X}}^* \tag{3.111}$$

ポテンシャルエネルギ

$$P = P(\boldsymbol{D}^*) \tag{3.116}$$

が得られた. これらのエネルギを 3.2.3節の概念モデルの場合と比較すれば, ポテンシャルエネルギがより一般的な形で表されてはいるが, 上添字 $(*)$ が付されていることを除いて形式的には同じであることがわかる. したがって, 3.2.3節で述べた手順をそのまま適用することにより, 適応トラスの実モデルの運動方程式が得られる. すなわち, Lagrange 関数

$$\mathcal{L} = T - U + P + A + \boldsymbol{\lambda}^T(\boldsymbol{D} - \boldsymbol{X} - \boldsymbol{U}) \tag{3.120}$$

より, Lagrange の運動方程式が導かれ,

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{M}^{XX^*} \ddot{\boldsymbol{X}}^* + \boldsymbol{M}^{XU^*} \ddot{\boldsymbol{U}}^* - (\boldsymbol{J}^{LX^*})^T \left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{L}^*}\right)^T \\ &\qquad + (\boldsymbol{J}^{LX^*})^T \left(\frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{L}^*}\right)^T - \boldsymbol{F}^* = \left(\frac{\partial A}{\partial \boldsymbol{X}^*}\right)^T \end{aligned} \tag{3.121}$$

$$\boldsymbol{M}^{UU^*} \ddot{\boldsymbol{U}}^* + \boldsymbol{M}^{UX^*} \ddot{\boldsymbol{X}}^* + \boldsymbol{K}^* \boldsymbol{U}^* - \boldsymbol{F}^* = \boldsymbol{O} \tag{3.122}$$

$$\boldsymbol{D}^* = \boldsymbol{X}^* + \boldsymbol{U}^* \tag{3.123}$$

が得られる. ここで,

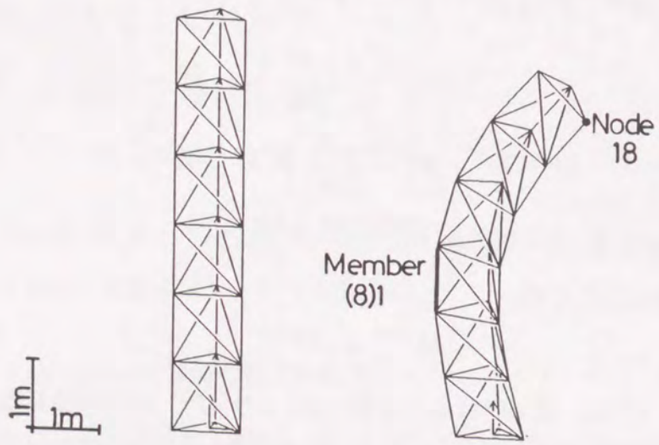
$$\boldsymbol{M}^{XU^*} = (\boldsymbol{M}^{UX^*})^T \tag{3.124}$$

である. ただし, 式 (3.89) および (3.112) より, $\boldsymbol{J}^{LX^*}$における縦部材のたわみおよびねじれ $(\boldsymbol{Y}_n)$ に対応する要素は運動方程式に影響を与えないことがわかる. このことは, 変形を考慮しない剛体運動モデルにおいては縦部材のたわみおよびねじれは存在しないことに対応している.

3.4 適応トラスの動力学特性の検討

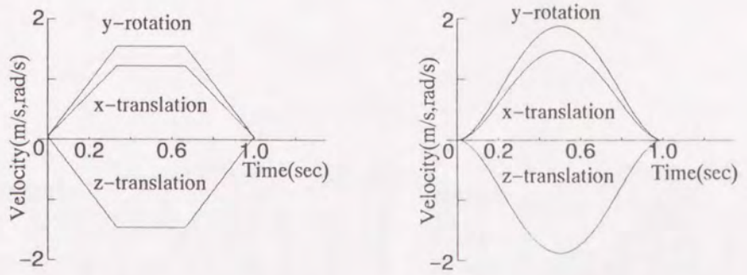
3.4.1 動力学シミュレーション

前節までで導いた運動方程式に基づき, 概念モデルおよび実モデルの動力学シミュレーションを行う. 18 モジュールの適応トラスを用い, 図 3.4(a) に示す初期姿勢 ($\boldsymbol{W}^0 = [0, 0, 6(\mathrm{m}), 0, 0, 0(\mathrm{deg})]^T$) から (b) に示す最終姿勢 ($\underline{\boldsymbol{W}} = [1, 0, 5(\mathrm{m}), 0, 45, 0(\mathrm{deg})]^T$) まで 1.0 秒で形態を変化させた場合のシミュレーションを行った. 双方のモデルにおいて各々の部材の質量は 4kg, 引っ張り剛性は 50MN とした. また, 実モデルにおける節点オフセットの大きさは部材長さの 10%程度を想定し, 表 2.1に示したものを用いた. 縦部材の曲げ剛性およびねじり剛性は $50\mathrm{kNm}^2$および $50\mathrm{kNm}^2/\mathrm{rad}$ とした. 運動に用いた速度パターンは, 図 3.5(a) に示す台形速度パターンと (b) に示す加加速度二乗和最小化速度パターン[40]で



(a) 初期姿勢　　(b) 最終姿勢

図 3.4: 動力学シミュレーションに用いた初期姿勢および最終姿勢



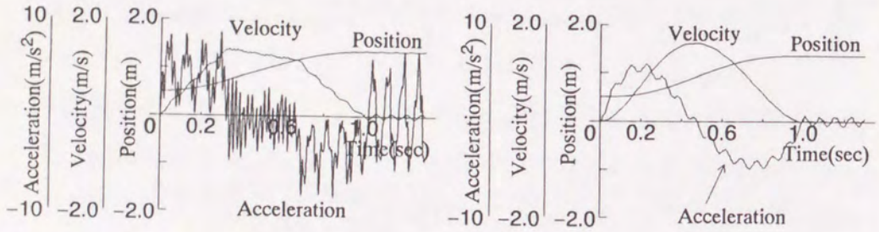
(a) 台形速度パターン　　(b) 加加速度二乗和最小化速度パターン

図 3.5: シミュレーションに用いた速度パターン

あり, 運動後 0.3 秒間の最終姿勢における残留振動までのシミュレーションを行った. 数値積分は時間ステップ 0.002 秒 [2] で Newmark β法[119]($\beta = 1/4$) を用いた.

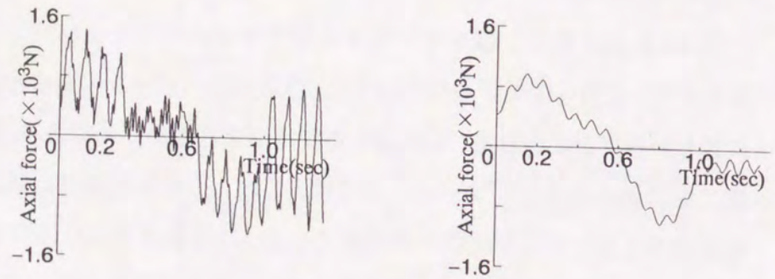
図 3.6および 3.7に, 概念モデルおよび実モデルのシミュレーション結果を示す. どちらのモデルについても, 台形速度パターンの場合の加速度に激しい振動が見られる. これは加速度の不連続性のためであり, 加加速度二乗和最小化速度パターンのほうは, このような不連続性に起因する振動は発生していないことが示されている. 速度のグラフに注目すれば, 実モデルのほうが概念モデルに比較して長い周期の振動を伴っていることがわかるが, このことは固有振動数 (後述) の違いに関連している. 部材に作用する軸力は加速度に対応した振動を示しており, 実モデルの縦部材 (8)1 に作用する曲げおよびねじりのモーメントを見れば, これらのモーメントの振動の激しさも用いた速度パターンにより異なっていることが示されている. 速度, 加速度の結果を見れば, 何れの速度パターンに

[2] 後述する固有振動数との関連でこの程度の時間ステップとした.



(a) 台形速度パターンの場合　　(b) 加加速度二乗和最小化速度パターンの場合

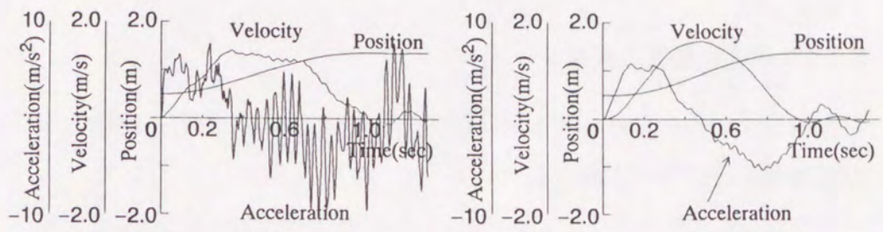
節点 18 の x 軸方向の運動と振動



(c) 台形速度パターンの場合　　(d) 加加速度二乗和最小化速度パターンの場合

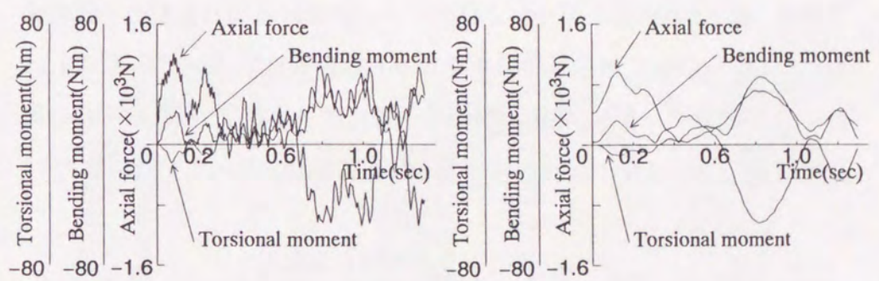
縦部材 (8)1 に作用する軸力

図 3.6: 概念モデルのシミュレーション結果



(a) 台形速度パターンの場合　　(b) 加加速度二乗和最小化速度パターンの場合

節点 18 の x 軸方向の運動と振動



(c) 台形速度パターンの場合　　(d) 加加速度二乗和最小化速度パターンの場合

縦部材 (8)1 に作用する軸力と曲げおよびねじりのモーメント

図 3.7: 実モデルのシミュレーション結果

ついても概念モデルのほうが小さな振幅の激しい振動を伴っていることが観察され, 概念モデルと実モデルの動力学的特性が明確に異なっていることを示している. このことは特に台形速度パターンの場合に顕著である.

3.4.2 固有振動数と振動モード

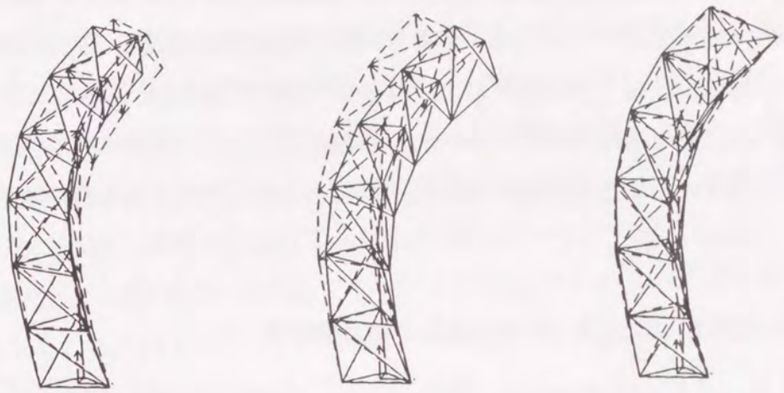
機械システムにおける基本的な動力学的特性である, 固有振動数および振動モードについて調べる.

前節で行った動力学シミュレーションの最終姿勢における, 概念モデルおよび実モデルの適応トラスの 3 次までの固有振動数および振動モードを表 3.1および図 3.8に示す. 表 3.1(II–IV) は, 実モデルにおける縦部材の曲げおよびねじりの影響を調べるため, これらの変形が生じないように曲げ剛性 (II, IV) およびねじり剛性 (III, IV) を 10^6倍にした場合の結果である. 表3.8の概念モデルおよび実モデルにおける固有振動数を比較すれば, これらの結果からも節点オフセットの影響は明らかである. 図 3.8に示した振動モードも, 特に 3 次のモードに注目すれば, 概念モデルの場合には適応トラス全体がねじれるような形の振動となっているのに対し,

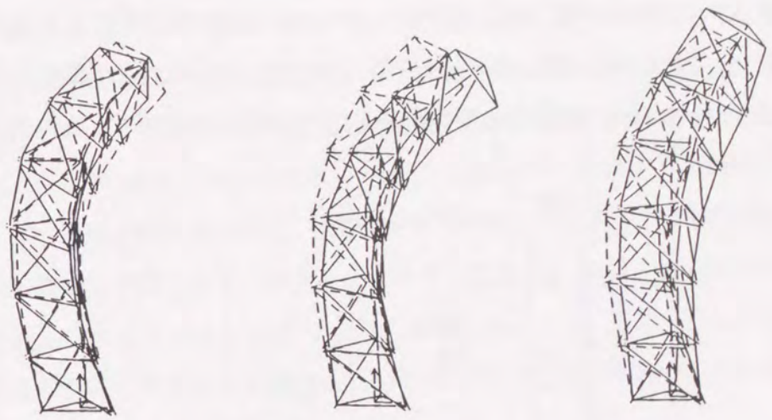
表 3.1: 適応トラスの固有振動数*

モデル		曲げ剛性 (kNm^2)	ねじり剛性 (kNm^2/rad)	固有振動数 (Hz) 1 次	2 次	3 次
概念モデル		–	–	9.065	13.371	27.600
実モデル	I	5.0	5.0	3.232	3.896	8.144
	II	5.0×10^6	5.0	3.549	4.288	8.739
	III	5.0	5.0×10^6	5.480	7.649	16.744
	IV	5.0×10^6	5.0×10^6	8.831	13.081	28.447

* 部材の引張剛性は 50MN, 質量は 4kg とした.



(a) 1 次　(b) 2 次　(c) 3 次
概念モデルの振動モード



(d) 1 次　(e) 2 次　(f) 3 次
実モデルの振動モード

図 3.8: 適応トラスの振動モード

実モデルの場合には先端部が上下方向, 中央部が左右方向の振動となっており, 顕著に異なっていることがわかる. また, 表3.1に示した, 曲げおよびねじりの変形が生じないように剛性を大きくしたIVの結果は, 概念モデルの結果に近いものとなっており, 動力学的特性に与える節点オフセットの影響は, 縦部材の曲げおよびねじりに起因することが示されている. さらに, 曲げ剛性のみを大きくしたIIの結果と, ねじり剛性のみを大きくしたIIIの結果とを比較することにより, 特にねじりによる影響が大きいことがわかる.

3.4.3 節点オフセットの大きさと動力学特性

適応トラスの実現に際して節点オフセットの存在が避けられないものである以上, 動力学的特性を考慮した適切な節点オフセットを設計することが重要となる. ここでは, そのための考察のひとつとして, 節点オフセットの大きさの変化による適応トラスの動力学的特性の変化に注目する. 前節で用いた姿勢に基づいた, 節点オフセットの大きさの変化にともなう1–3次の固有振動数の変化を表すグラフを図3.9に示す. このグラフ

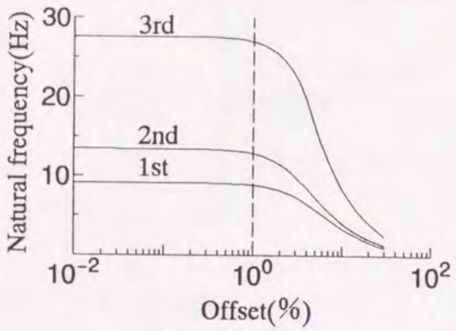


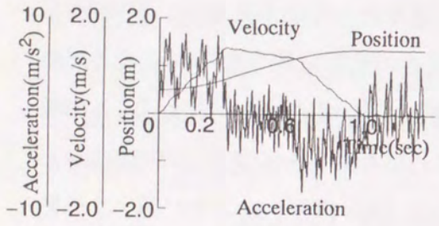
図3.9: 節点オフセットの大きさの変化による固有振動数の変化

から, 1%程度 (表2.1に示した値の1/10) の節点オフセットであれば, その影響をかなり抑えることができることが推測される. これに基づき, 節点オフセットの大きさを1%程度として3.4.1節と同様のシミュレーションを行った結果を図3.10に示す. 得られた結果を, 図3.6に示した概念モデルによる結果および図3.7に示した実モデルによる結果と比較すれば, 速度および加速度のグラフが概念モデルの結果に酷似していることがわかる. 軸力のグラフも概念モデルの結果に近いものとなっており, この場合には, 縦部材に作用する曲げおよびねじりのモーメントは図3.7に示した実モデルによる結果に比較して1/15–1/20程度となっている. この結果からもこれらのモーメントが概念モデルと実モデルの動力学的特性に大きく影響を及ぼしていることが推察される.

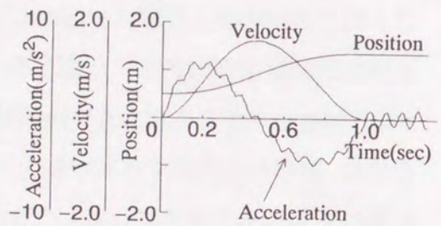
3.5 おわりに

本章では, 適応トラスのメカニズムとしての機能を考えた場合に重要となる, 機構運動を考慮した動力学について述べた. 瀬口ら[114]によって示されたマトリクス構造解析を拡張した手法に基づき, ひずみエネルギ, 運動エネルギ, ポテンシャルエネルギの定式化を行い, 適応トラスの概念モデルの運動方程式を導いた. 運動エネルギの定式化の際に, 可変長部材の伸縮機構を考慮した慣性マトリクスの導出を示した. また, 節点部の方向と縦部材の曲げおよびねじりを導入することにより, 運動を記述する変数を拡張し, 実モデルの場合にも概念モデルと同様の形式の運動方程式が得られることを示した.

導出した運動方程式に基づき, シミュレーションを通じて適応トラスの概念モデルおよび実モデルの動力学的特性を調べた. 得られた結果より, 節点オフセットが動力学的特性に及ぼす影響は明確であることが示

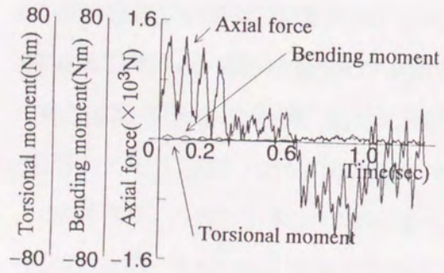


(a) 台形速度パターンの場合

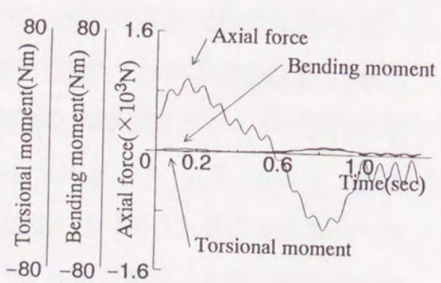


(b) 加加速度二乗和最小化速度パターンの場合

節点 18 の x 軸方向の運動と振動



(c) 台形速度パターンの場合



(d) 加加速度二乗和最小化速度パターンの場合

縦部材 (8)1 に作用する軸力と曲げおよびねじりのモーメント

図 3.10: 節点オフセットを1%程度とした実モデルのシミュレーション結果

された. また, 基本的な動力学的特性のひとつである固有振動数から, 節点オフセットが動力学的特性に及ぼす影響が縦部材の曲げおよびねじりに起因することが示され, 特にねじりの影響が大きいことがわかった. 節点オフセットの大きさの変化による固有振動数の変化を調べることにより, オフセット大きさをある値より小さくすることにより, その動力学的特性に与える影響を抑えられることが示された.

第4章

モジュール形ニューラルネットを用いた動作誘導

4.1 はじめに

本論文で取り上げている適応トラスは非常に多くの機構的自由度を持つ機械システムであり，作業空間において記述される目的を達成するのに必要な自由度をはるかに上回る冗長な自由度を持つ．これらの自由度を有効に活用することにより，適応トラスはやわらかな機械としての特性を発揮することが期待される．本章および次章では，このような視点から適応トラスの動作誘導手法について考察する．

目的機能の達成を中心に考えられた機械システムでは，達成すべき目的が定まれば，それに応じてどのような動作を行えばよいかは非冗長システムという意味で一意に定まるように構成されるのが普通であり，これをいかに正確に行うかという制御の側面が中心的な問題であった．これに対して冗長な自由度を有する機械システムにおいては達成すべき目的が規定されてもそれを実現する動作には多数のバリエーションがあり，どのような動作を行えばよいかという問題が重要となる．これも広い意味での制御の問題であるが，前者との対比においては誘導あるいはガイダンスの問題ということができる．実際，ロボットマニピュレータなどの分野では冗長な機構的自由度を持つメカニズムが注目され，よりよい動作を行うための冗長自由度の活用が研究されている．例えば，冗長マニピュ

レータメカニズムの増分形の運動記述におけるヤコビ行列の疑似逆行列を用いて関節変数の増分を生成する手法[13][27][49][52] はその中でも代表的なものであり, 適応トラスにおいてもこれまでに議論してきた機構関係のヤコビ行列による可変長部材の部材長の増分的変化の決定はこれに相当する. また, 特異姿勢の回避[118]あるいは障害物の回避[9][50][57]に冗長自由度を活用する手法などの研究も報告されている.

このような数理的なアプローチとは異なり, 人間の脳の研究から生まれてきた, ニューラルネットワークモデル[6][38][44][59][137] を用いたメカニズムの制御や誘導手法の研究も行われている[48][73][120][124] [126][134][135]. 本章では, やわらかな機械としての適応トラスの動作を考えるにあたり, 次章で述べる動作評価規範獲得の実現や環境・条件の変化に対する動作誘導システムの柔軟な対応などを考慮して, 階層形のニューラルネットワーク[109]を用いた適応トラスの動作誘導手法を提案する. また, 適応トラスの構成や動作評価規範の変化への柔軟性の確保ならびに学習処理の労力の軽減のための, ニューラルネットワークのモジュール化構成について述べる.

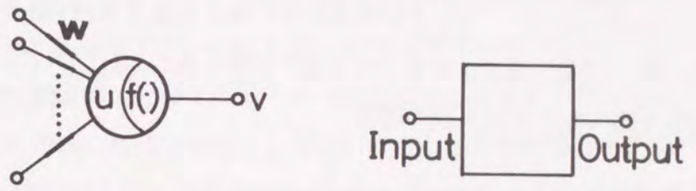
4.2 階層形ニューラルネットによる適応トラスの動作誘導

本章では, 階層形のニューラルネットワークとその代表的な学習手順である誤差逆伝播法[109]を基礎とする, 適応トラスの動作誘導手法を提案する. 階層形ニューラルネットワークおよび誤差逆伝播法について概説し, 提案する動作誘導手法の基本的な考え方を述べる.

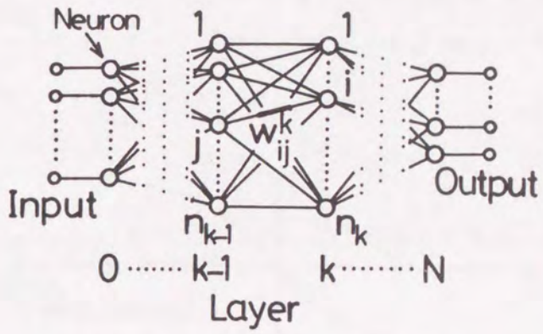
4.2.1 階層形ニューラルネットワークと誤差逆伝播学習

(1) ネットワークの構成

本研究で用いる階層形ニューラルネットワークの基本構成を図 4.1に示す. 階層形のニューラルネットワークは, 図 4.1(a) に示す多入力 1 出力の素子である人工ニューロン素子 (以下ニューロン) を, 図 4.1(b) に示すように層状に配置したものである. また, 4.3節で述べるようにこのようなネットワークを複数接続することにより新たなネットワークを構成する場合には, ニューラルネットワークの入出力のみに注目した図 4.1(c) に



(a) 人工ニューロン素子　　(c) 入出力に注目したネットワークの表現



(b) 階層形ニューラルネットワーク

図 4.1: ニューラルネットワークの構成

示すような略記表現を用いる.

図 4.1(b) に示す, 第 0 層を入力層, 第 N層を出力層とする階層形のニューラルネットワークにおける第k層のi番目のニューロン(k, i) $(k = 1, \cdots, N; i = 1, \cdots, n_k)$ のふるまいは, 次式のような数理モデルにより表される.

$$v_i^k = f(u_i^k) \tag{4.1}$$

$$u_i^k = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} w_{ij}^k v_j^{k-1} \tag{4.2}$$

ここで, v_i^kはニューロン (k,i) の出力, u_i^kはその内部状態を表し, w_{ij}^kはニューロン (k,i) と $(k-1,j)$ との間の結合の強さを表す係数 (結合重み) である. また, 関数 fはニューロンの入出力特性を表し, ここでは図 4.2に示す応答を持つシグモイド状の関数

$$f(x) = \frac{2}{1+\exp(-2x)} - 1 \tag{4.3}$$

を用いる. 式 (4.1)-(4.3) より, 階層形ニューラルネットワークの出力$\boldsymbol{v}^N = [v_1^N, \cdots, v_{n_N}^N]^T$は, 入力$\boldsymbol{v}^0 = [v_1^0, \cdots, v_{n_0}^0]^T$およびネットワークの結合重み$\boldsymbol{w} = [\boldsymbol{w}^1, \cdots, \boldsymbol{w}^N]$, $\boldsymbol{w}^k = [w_{ij}^k, i = 1, \cdots, n_k; j = 1, \cdots, n_{k-1}]$ に

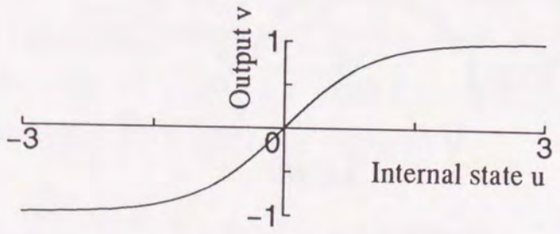


図 4.2: ニューロンの入出力特性

よって定まることがわかる. すなわち, 次のような形式でニューラルネットワークの入出力関係を表すことができる.

$$\boldsymbol{v}^N = \boldsymbol{v}^N(\boldsymbol{v}^0; \boldsymbol{w}) \tag{4.4}$$

階層形のニューラルネットワークは, 学習機能によって望ましい入出力関係を構成することができるが, これは, 式 (4.4) において結合重み$\boldsymbol{w}$を調整することにより行われる.

(2) 誤差逆伝播学習

ニューラルネットワークの入出力間に望まれる任意の写像関係を入出力対の標本から獲得するいわゆる学習は, 階層形ニューラルネットワークの代表的な機能のひとつである[26]. このためのネットワーク内の結合重みの調節に用いられる学習法としてはいくつかのものが提案されているが[29][146][147], ここでは最も基本的な, 最急降下法による誤差逆伝播法[109]に議論を限定する[1]. 与えられた入力の標本値$\boldsymbol{v}^{0S}$に対する, ネットワークの出力$\boldsymbol{v}^N(\boldsymbol{v}^{0S}, \boldsymbol{w})$ と望ましい出力$\boldsymbol{v}^{NS} = [v_1^{NS}, \cdots, v_{n_N}^{N\ S}]^T$ との間で定義される誤差関数

$$\begin{aligned} E(\boldsymbol{w}) &= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n_N}(v_i^N(\boldsymbol{v}^{0S}; \boldsymbol{w}) - v_i^{NS})^2 \\ &= \frac{1}{2}(\boldsymbol{v}^N(\boldsymbol{v}^{0S}; \boldsymbol{w}) - \boldsymbol{v}^{NS})^T(\boldsymbol{v}^N(\boldsymbol{v}^{0S}; \boldsymbol{w}) - \boldsymbol{v}^{NS}) \end{aligned} \tag{4.5}$$

を, 結合重み$\boldsymbol{w} = [w_{ij}^k]$ を調節することにより最小化する. すなわち, 次に示す最小化問題

$$\text{Minimize} \quad E(\boldsymbol{w}) \quad \text{with respect to} \quad \boldsymbol{w} \tag{4.6}$$

[1] 学習過程においてネットワークの構造を決定してゆくことも重要な側面であるが[29][68], ここではこの点についてもふれないこととし, ネットワークの構造はあらかじめ固定されているものとする.

の解の探索を, 最急降下法の考え方に従い,

$$w_{ij}^k \leftarrow w_{ij}^k - \Delta w_{ij}^k \tag{4.7}$$

として反復的に結合重みを調整することにより行う. 結合重みの調整量 Δw_{ij}^kは, 出力層における誤差の調整量

$$\Delta v_i^N = \gamma \frac{\partial E}{\partial v_i^N} = \gamma (v_i^N - v_i^{NS}) \tag{4.8}$$

を, 入力層に向かって

$$\begin{aligned} \Delta v_i^k &= \gamma \frac{\partial E}{\partial v_i^k} \\ &= \sum_{j=1}^{n_{k+1}} \Delta v_j^{k+1} f'(u_j^{k+1}) w_{ji}^{k+1} \end{aligned} \tag{4.9}$$

に従い伝播させ, これに基づき次のように算定される.

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij}^k &= \gamma \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^k} \\ &= \Delta v_i^k f'(u_i^k) v_j^{k-1} \end{aligned} \tag{4.10}$$

ここで, γは微小定数である. この調整を多数の入出力対の標本に対して行うことにより, 所期の写像関係を入出力関係とするニューラルネットワークが実現される.

以上がいわゆる誤差逆伝播学習の手順であるが, これは 2 段階の作業から成り立っている. ひとつは式 (4.8) および (4.9) で示される, 出力層における誤差の調整量の入力層方向への逆伝播であり, もうひとつは式 (4.7) および (4.10) で示されている, 各層における結合重みの調整である. 以下では前者を誤差逆伝播則, 後者を結合重みの学習則として区別する. なお, 誤差の調整量の逆伝播則である式 (4.9) は, 内部状態 u_i^kに基づいて表現されるのが一般的[6][109]であるが, 次節で述べる逆伝播則を用いた動作誘導の考え方を簡潔に述べるため, ニューロンの出力 v_i^kに注目した表現を用いたことを付記しておく.

4.2.2 逆伝播則を用いた動作誘導の基本的な考え方

(1) 逆機構問題

2章で示したように, 適応トラス全体の機構関係, すなわち節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$および作業空間$\boldsymbol{W}$と部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$との関係は

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \tag{2.4}$$

および

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \tag{2.37}$$

として表される. 作業空間ベクトルに注目すれば, 適応トラスの逆機構問題は, 目標作業空間ベクトル $\underline{\boldsymbol{W}}$ に対応する部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$の探索問題

$$\text{Find} \quad \boldsymbol{L} \quad \text{such that} \quad \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) = \underline{\boldsymbol{W}} \tag{4.11}$$

となる. 作業空間における誤差関数

$$E_W = \frac{1}{2}(\boldsymbol{W} - \underline{\boldsymbol{W}})^T (\boldsymbol{W} - \underline{\boldsymbol{W}}) \tag{4.12}$$

を導入すれば, 問題 (4.11) は E_Wの最小化問題として次のように定式化することができる.

$$\text{Minimize} \quad E_W \quad \text{with respect to} \quad \boldsymbol{L} \tag{4.13}$$

この問題を最急降下法の考え方にしたがって解くならば, 部材長さベクトル$\boldsymbol{L}$の修正を

$$\boldsymbol{L} \leftarrow \boldsymbol{L} - \Delta \boldsymbol{L} \tag{4.14}$$

として繰り返し行うことになる. ただし,

$$\Delta \boldsymbol{L} = \gamma \frac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{L}} \tag{4.15}$$

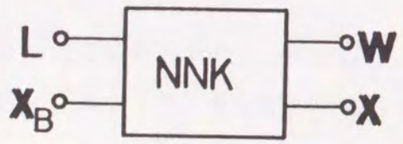


図 4.3: 適応トラスの機構関係を表すネットワーク NNK

である.

ここで, 図 4.3に示すような入力と出力の信号を持つニューラルネットワークを考え[2], 入力信号$\boldsymbol{v}^0_{\rm NNK} = [\boldsymbol{L}^T, \boldsymbol{X}_B^T]^T$に対して出力信号$\boldsymbol{v}^N_{\rm NNK}$が式 (2.4) の$\boldsymbol{X}$および式 (2.37) の$\boldsymbol{W}$となるように結合重み$\boldsymbol{w}_{\rm NNK}$を調節したものを, その結合重みの値も含めて NNK(Neural Network for Kinematics) とする. すなわち, ネットワーク NNK は次式のように特徴づけられる.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}^N &= \boldsymbol{v}^N_{\rm NNK}(\boldsymbol{v}^0_{\rm NNK}; \boldsymbol{w}_{\rm NNK}) \\ &= \boldsymbol{v}^N_{\rm NNK}([\boldsymbol{L}^T, \boldsymbol{X}_B^T]^T; \boldsymbol{w}_{\rm NNK}) \\ &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \\ \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4.16}$$

ここで, 下添字はネットワークを区別するためのものである. 式 (4.5), (4.12) および (4.16) を考慮して, 最小化問題 (4.13) と (4.6) とを比較すれば, その違いは, NNK の出力信号のうち$\boldsymbol{X}$に対応するものについては誤差の評価に含まれていないことと, 調整を行う変数が入力$\boldsymbol{v}^0_{\rm NNK}$の一部である$\boldsymbol{L}$であるか, ネットワークの入出力関係を表す結合重み$\boldsymbol{w}_{\rm NNK}$である

[2] ここでの議論では節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$に対応する出力は特に用いないが, 評価規範を考える際には節点位置を考慮することが必要となる.

かにあることがわかる. 出力層 (第 N層) における誤差の調整量

$$\Delta \boldsymbol{v}^N_{\rm NNK} = \gamma \frac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{v}^N_{\rm NNK}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma \dfrac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{v}^N_{\rm NNK(W)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma(\boldsymbol{W} - \underline{\boldsymbol{W}}) \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

を誤差逆伝播則の式 (4.9) により逆伝播させた結果, 入力層 ($k = 0$) においては

$$\Delta \boldsymbol{v}^0_{\rm NNK} = \gamma \frac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{v}^0_{\rm NNK}} = \begin{bmatrix} \gamma \dfrac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{v}^0_{\rm NNK(L)}} \\ \gamma \dfrac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{v}^0_{\rm NNK(X_B)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \dfrac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{L}} \\ \gamma \dfrac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{X}_B} \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

が得られる. ここで, 下添字の $(\boldsymbol{W})$, $(\boldsymbol{L})$, $(\boldsymbol{X}_B)$ などは入出力の一部を区別するためのものである. したがって, ネットワーク NNK の入出力関係を表現するパラメータである結合重み$\boldsymbol{w}_{\rm NNK}$は固定とし, 式 (4.18) に示す, 逆伝播により得られる$\Delta \boldsymbol{v}^0_{\rm NNK}$の一部である$\gamma(\partial E_W/\partial \boldsymbol{L})$ を用いて式 (4.14), (4.15) に従い$\boldsymbol{L}$の調整を反復的に行えば, 最急降下法により最小化問題 (4.13) を解くことができ, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$に対応する部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$が得られる.

以上の手順をまとめると, 次のようになる.

[階層形ニューラルネットワークによる逆機構問題の解法]

1. 適応トラスの機構関係を表現するニューラルネットワーク, NNK を準備する. ネットワークの入出力関係が機構関係を表現するように, 結合重みを通常の誤差逆伝播学習により調節し, そこで固定する.

2. ニューラルネットワーク NNK の入力に部材長$\boldsymbol{L}$およびベース位置$\boldsymbol{X}_B$を与え, ネットワークの順方向伝播 (式 (4.1),(4.2) 参照) を行い, それらに対応する出力 (作業空間ベクトル)$\boldsymbol{W}$を得る.

3. ニューラルネットワークNNKの現在の出力($\boldsymbol{W}$)の, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$に対する誤差$E_W$に基づく出力層における調整量$\Delta \boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK}}$の逆伝播(4.9)を実行する($k = N, \cdots, 1$). ただし, ネットワークの結合重み$\boldsymbol{w}_{\mathrm{NNK}}$は, 適応トラスの機構関係を表現するようにすでに調整されているため固定として調整は行わない.

4. 入力層まで逆伝播された調整量$\Delta \boldsymbol{v}^0_{\mathrm{NNK}}$のうち, 部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$に対応するもの(式(4.18)参照)を用いて式(4.14)に従い$\boldsymbol{L}$の調整を行う. このとき, $\Delta \boldsymbol{v}^0_{\mathrm{NNK}}$のうちベース位置$\boldsymbol{X}_B$に関するものについては, $\boldsymbol{X}_B$が適応トラスの環境と考えられる量であり, 動作誘導によって変更できない性質のものであるため, その調整は行わない.

5. 手順2より処理を繰り返す.

このようにして, 階層形ニューラルネットワークを用いて表現した適応トラスの機構関係に基づき, 逆機構問題を解くことができる.

なお, ここでは逆機構問題(4.11)において等式制約条件である目標作業空間ベクトルの達成のみを取り扱ったが, 同様の手順により障害物の回避などの不等式制約条件を取り扱うことも可能である(付録A.7節参照). 以後においても等式制約条件に限定して議論を行うが, これにより一般性が損なわれることはない.

(2) 動作評価規範の考慮

適応トラスの動作誘導においては, 作業空間ベクトルに対する冗長な機構的自由度の有効な活用がひとつの主眼となる. ここでは, 明示的に選択された動作評価規範に基づいて冗長自由度を活用する適応トラスの動作誘導を, 前述と同様のニューラルネットワークを用いた手法により行う

場合について述べる.

動作評価規範を表す部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$および節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$の関数を

$$g = g(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S}) \tag{4.19}$$

として導入する. ここで, $\boldsymbol{S}$は動作を評価する際に参照される環境・条件などを表す変数をまとめたベクトルである. 節点位置ベクトル$\boldsymbol{X}$が部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$により定まることを考慮すれば, 式(4.19)は

$$g = g(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}_B); \boldsymbol{S}) = g^L(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{S}) \tag{4.20}$$

と書くこともできる. 式(4.20)を考慮すれば, 動作評価規範に基づく適応トラスの逆機構問題は次のように定式化することができる.

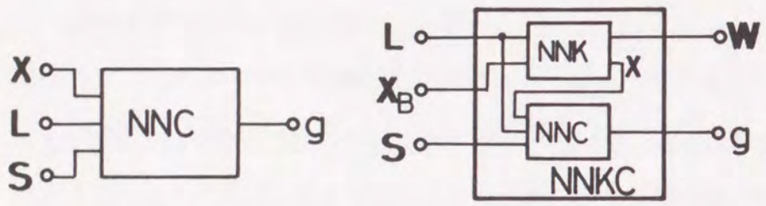
$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad g \quad \text{with respect to} \quad \boldsymbol{L} \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) = \underline{\boldsymbol{W}} \end{aligned} \tag{4.21}$$

制約付き最小化問題(4.21)における目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$についての等式制約を, 式(4.12)に示した誤差関数によるペナルティ項として取り扱うことにより, 次式に示す条件無し最小化問題に変換する.

$$\text{Minimize} \quad g + \eta E_W \quad \text{with respect to} \quad \boldsymbol{L} \tag{4.22}$$

ここで, ηはペナルティ係数である.

条件無し最小化問題(4.22)をニューラルネットワークを用いて解くことを考える. 目的関数のうち機構制約条件に関する項E_Wを誤差とするネットワークはすでに図4.3として得られているので, 動作評価規範gに関するネットワークを新たに考えればよい. 図4.4(a)に示すような, 入力として$\boldsymbol{L}$, $\boldsymbol{X}$および$\boldsymbol{S}$を持ち, スカラである出力が$g(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S})$となる



(a) 動作評価規範を表すネットワーク NNC　　(b) NNK と NNC を組み合わせたネットワーク NNKC

図 4.4: 評価規範に基づく動作誘導のためのニューラルネットワーク

ように結合重み$\boldsymbol{w}_{\mathrm{NNC}}$を調節したネットワーク NNC(Neural Network for Criterion) を準備する. これとネットワーク NNK とを組み合わせたものをネットワーク NNKC (Neural Network for Kinematics and Criterion) とする. ネットワーク NNKC の出力において定義される, 次の誤差関数

$$E_{gW} = E_g + \eta E_W \tag{4.23}$$

を考える. ここで,

$$E_g = g \tag{4.24}$$

は, 評価関数 gの最小化のための疑似的な誤差関数である[3]. 前述のニューラルネットワークを用いた逆機構問題の解法を参照すれば, 式 (4.23) に示した E_{gW}の部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$についての最小化をネットワーク NNKC を用いて行うことができる. これは, 問題 (4.22) あるいは (4.21) を解く

[3] あるいは, 仮想的な目標値としての非常に大きな絶対値を持つ負の値$\underline{g}$を考えて

$$E_g = \frac{1}{2}(g - \underline{g})^2$$

としてもよい. 最急降下法では誤差関数のこう配のみが意味を持つため, その意味で両者は等価である.

ことにほかならない. このようにして, 適応トラスの評価規範に基づく動作誘導を階層形ニューラルネットワークにより行うことができる.

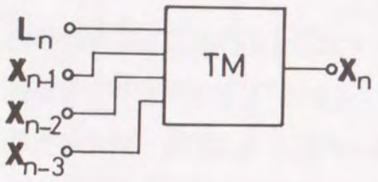
4.3　ニューラルネットワークのモジュール化構成

前節で提案したニューラルネットワークによる動作誘導を行うためには, 適応トラスの機構関係を表すネットワーク NNK および動作評価規範を表すネットワーク NNC が必要となる. 適応トラスが多くの機構的自由度を持つことにより, これらのネットワークの入力信号の数も大きくなる. これに対応してネットワークそのものも必然的に大規模とならざるを得ず, 4.2.1節で述べたような学習手順を直接的に用いることによりこれらのネットワークを構成することは非常に困難となる. そこで, 複数の比較的小規模なニューラルネットワークのモジュール (ネットワークモジュール) に対して個別に学習処理を行い, これらを組み合わせることにより, 全体の動作誘導のためのニューラルネットワークを構成することを考える.

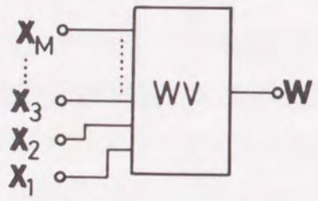
4.3.1　適応トラスの機構学的構成に基づくネットワークの構成

2.2節で述べたように, 適応トラスの基本構成単位は 1 つの頂点と 3 本の可変長部材からなるトラスモジュールであり, 適応トラス全体の機構関係もトラスモジュールの機構関係の組み合わせにより構成される (2.2.2節参照). このことに注目すれば, 図 4.5(a) に示すトラスモジュールの機構関係式

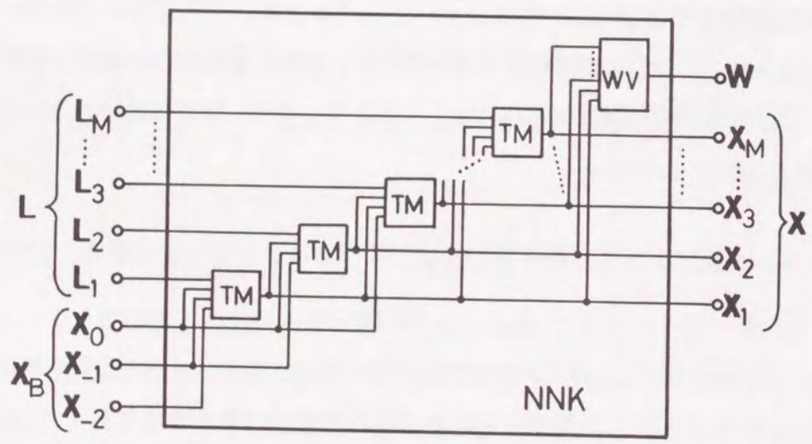
$$\boldsymbol{X}_n = \boldsymbol{X}_n^L(\boldsymbol{L}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}) \tag{2.2}$$



(a) トラスモジュールの機構関係を表す TM



(b) 作業空間ベクトルのための WV



(c) 適応トラス全体の機構関係を表すネットワーク NNK のモジュール化構成

図 4.5: 機構学的構成に基づくネットワークの構成

に対応するネットワークモジュール TM(Truss Module) を個々のトラスモジュール毎に準備し[4], 図 4.5(b) に示す作業空間ベクトルと先端の 3 節点の位置の間に成り立つ関係式

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{X}_T) \tag{2.35}$$

に対応するネットワークモジュール WV(Workspace Vector) とそれら相互の関係に注意しながら組み合わせることにより, 適応トラス全体の機構関係式

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \tag{2.4}$$

および

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{W}^{X_T}(\boldsymbol{B}_{X_T}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B)) = \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L}; \boldsymbol{X}_B) \tag{2.37}$$

を表すニューラルネットワーク NNK が図 4.5(c) に示すように構成される[5]. ここで述べたニューラルネットワーク NNK のモジュール化構成は, 適応トラスの機構学的構成に対応しており, メカニズム (適応トラス) と動作誘導システム (ニューラルネットワーク) の構成が調和しているという点に注目することができる. また, このような構成により, ネットワークモジュール TM をビルディング・ブロックとして, 様々な規模の適応トラスに柔軟に対応したニューラルネットワークの構成が可能となる[6].

[4] ここで,「ネットワークモジュールを準備する」とは, ネットワークの入出力関係を表す結合重みを誤差逆伝播学習あるいは他の手法により望ましい関係に調節したものを用意することを意味する. 本論文の以後の記述においても同様である.

[5] ニューロンの出力値は図 4.2あるいは式 (4.3) に示すように限られた範囲の値しか取り得ないため, この構成をそのまま用いることはできない. 適当なスケーリングを行ったとしても, 様々な規模の適応トラスへの対応を考えれば一般性を損なう恐れがある. 実際には, 付録 A.8節に示す構成の TM を用いる.

[6] ニューラルネットワークによる関数関係の表現は近似による誤差を含むため, 適応トラスの規模が大きい場合には, 多くのネットワークモジュールの結合による誤差の累積が問題となる. ニューラルネットワーク NNK がモジュール化構成により得られた後, 全体としての誤差逆伝播学習処理による調整を施すことにより, このような累積による誤差を抑制することができる.

4.3.2 動作評価規範とネットワークの構成

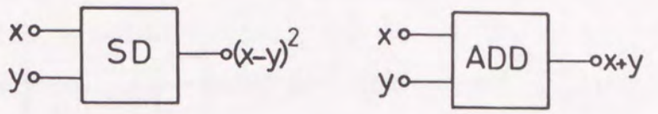
適応トラスの動作を評価する規範としては様々なものが考えられるが, ここでは, 2 種類の評価規範を例にとり, ネットワーク NNC のモジュール化構成について述べる. すなわち, 適応トラスの基準姿勢を考え, そこでの可変長部材の長さを$\boldsymbol{L}^{\rm ref} = [(\boldsymbol{L}_1^{\rm ref})^T, \cdots, (\boldsymbol{L}_M^{\rm ref})^T]^T$, ($\boldsymbol{L}_n^{\rm ref} = [l_{n1}^{\rm ref}, l_{n2}^{\rm ref}, l_{n3}^{\rm ref}]^T$), 節点位置を$\boldsymbol{X}^{\rm ref} = [(\boldsymbol{X}_1^{\rm ref})^T, \cdots, (\boldsymbol{X}_M^{\rm ref})^T]^T$, ($\boldsymbol{X}_n^{\rm ref} = [x_{n_x}^{\rm ref}, x_{n_y}^{\rm ref}, x_{n_z}^{\rm ref}]^T$), で表すこととし, そこからの部材長のずれの大きさ g^1

$$
\begin{aligned}
g^1 &= \sum_{n=1}^{M} g_n^1 \\
g_n^1 &= \sum_{i=1}^{3} (l_{ni} - l_{ni}^{\rm ref})^2
\end{aligned}
\tag{4.25}
$$

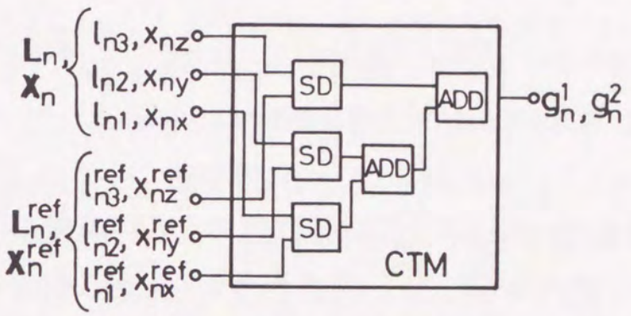
および節点位置のずれの大きさ g^2

$$
\begin{aligned}
g^2 &= \sum_{n=1}^{M} g_n^2 \\
g_n^2 &= \sum_{i=x,y,z} (x_{ni} - x_{n_i}^{\rm ref})^2
\end{aligned}
\tag{4.26}
$$

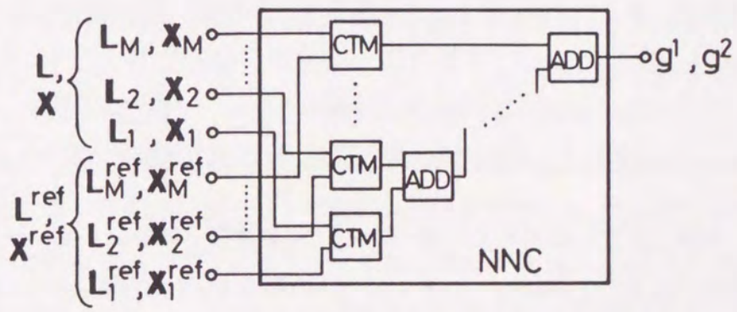
を考える. ここで, g_n^1およびg_n^2はそれぞれトラスモジュールnに対応した量である. 式 (4.25) および (4.26) を見れば, これらの評価規範が, 現在の状態を表す値と基準状態を表す値の差のトラスモジュール毎での二乗和, すなわち$\sum_{i=1}^{3}(l_{ni}-l_{ni}^{\rm ref})^2$あるいは$\sum_{i=x,y,z}(x_{ni}-x_{n_i}^{\rm ref})^2$の総和という構造を持つものであることがわかる. したがって, 図 4.6(a) に示す入力の差の二乗を出力とするネットワークモジュール SD(Square of Difference), および図 4.6(b) に示す入力の和を出力とするネットワークモジュール ADD(これは特性関数 $f(u) = u$ と単位結合重み $w_1 = w_2 = 1$ を持つ, 単一ニューロンにより構成される) を用いて図 4.6(c) に示すようにトラスモジュール毎の評価規範を表すネットワークモジュール CTM(Criterion for Truss



(a) 差の二乗を表す SD　　(b) 和を出力する ADD

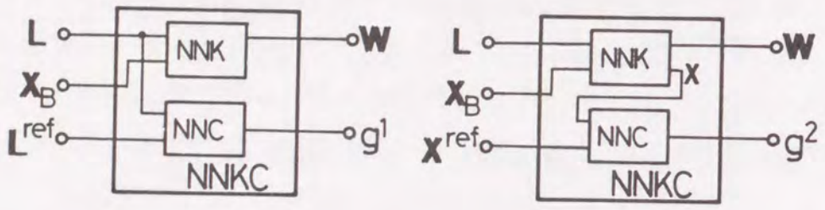


(c) トラスモジュールに対応する CTM の構成



(d) ニューラルネットワーク NNC のモジュール化構成

図 4.6: 動作評価規範 g^1あるいは g^2を表すネットワークの構成



(a) 部材長変化の二乗和 g^1の場合 (b) 節点位置変位の二乗和 g^2の場合

図 4.7: 評価規範に基づく動作誘導のためのネットワーク NNKC

Module) を構成し, それらを図 4.6(d) に示すように組み合わせれば, 評価規範 g^1あるいは g^2を表すニューラルネットワーク NNC が構成される.

このようにして得られたニューラルネットワーク NNC を, 図 4.7(a) あるいは (b) に示すように図 4.5(c) に示す NNK と組み合わせることにより, 評価規範 g^1あるいは g^2に基づく動作誘導のためのニューラルネットワーク NNKC が得られる. このことは, ニューラルネットワークの結合の仕方により, 同じ入出力関係を持つものでも異なった利用ができることも示唆している.

4.4 提案した手法に基づく適応トラスの動作

本章で提案した考え方に基づいて, 2章および3章のシミュレーションで用いたものと同様の, 18 モジュールの概念モデルの適応トラスを用いて動作誘導シミュレーションを行う. 前節で示した構成のニューラルネットワーク NNKC(図 4.7) を採用し, ネットワークモジュール TM および SD を, 以下のように個別の学習処理を行うことにより準備した. ネットワークモジュール TM は, 中間層は 3 層 (ニューロン数 40, 20, 10), 結合重みの初期値は–0.2 ～ 0.2 の一様乱数, 誤差逆伝播学習における係数γは 0.001 とし, 入力および出力に 1/2 のスケーリング値[7] を用いて 1 セット 40000 組の入出力対からなる学習パターンに対する 5 回の繰り返し学習を, 36 セットに対して行った. ネットワークモジュール SD は, 中間層は 3 層 (ニューロン数 20, 10, 5), 結合重みの初期値は–0.2 ～ 0.2 の一様乱数, 誤差逆伝播学習における係数γは 0.005 とし, 出力 1/4 のスケーリング値[8] による 1 セット 20000 組の入出力対からなる学習パターンに対する 5 回の繰り返し学習を, 18 セットに対して行った.

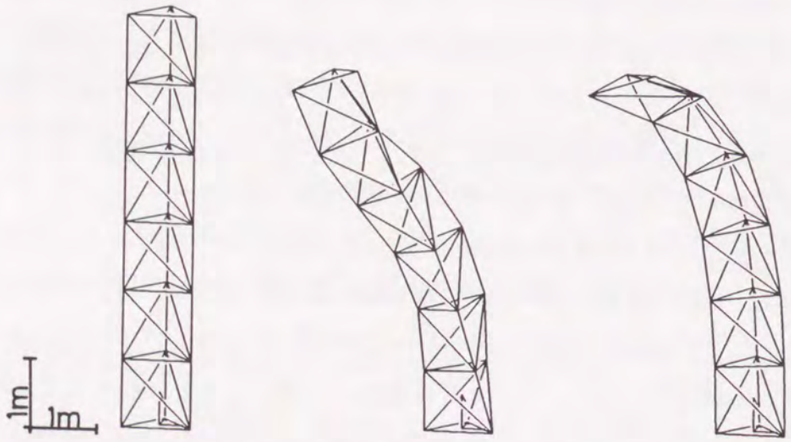
図 4.8(a) に示す基準姿勢 ($\boldsymbol{W}^{\mathrm{ref}} = [0,\ 0,\ 6(\mathrm{m}),\ 0,\ 0,\ 0(\mathrm{deg})]^T$) を初期形態とし, そこから, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}} = [-2,\ 0,\ 5(\mathrm{m}),\ 0,\ -15,\ 0(\mathrm{deg})]^T$ を達成する動作を, 評価規範 g^1および g^2に基づいて行った結果を図 4.8(b) および (c) と表 4.1に示す. 式 (4.23) におけるペナルティ項 E_Wに対する逆伝播の係数$\gamma\eta$は 0.002, 評価規範の項 E_{gW}に対する逆伝播のための係数γは 0.004(g^1の場合) および 0.002(g^2の場合) とし, 3000 回の順/逆方向伝播により$\boldsymbol{W}^{\mathrm{ref}}$から$\underline{\boldsymbol{W}}$まで同数の増分で変化する目標作業空間ベクトルに対する誤差を用いて動作誘導を行った. その後, 目標作業空間で 500 回の順/逆方向伝播を行い, 最終姿勢とした.

図 4.8において (b) と (c) とを比較すれば, 適用した評価規範によって最終姿勢が明確に異なっていることがわかる. 特に, 適応トラス先端の 3 節点からなる三角形の位置$\boldsymbol{X}_W$と姿勢$\boldsymbol{\Theta}_W$が作業空間において目標位置を達成した状態で式 (4.26) に示す評価規範 g^2を最小とするためには, 他の

[7] ネットワークモジュール TM における節点位置の取り扱いには隣接する節点間の相対値を用いているため, この程度のスケーリング値でよい (付録 A.8節参照).

[8] ネットワークモジュール SD を評価規範 g^2に対して適用する場合には, トラスモジュール数に応じたスケーリングを行うための線形特性関数を持つネットワークモジュールを入力側に接続して用いる.

節点は基準位置からできるかぎり動かなければよいことは明らかであり, 得られた姿勢 (図 4.8(c)) はこのことと対応した姿勢となっていることがはっきりとわかる. 表 4.1を参照すれば, 作業空間における誤差は 0.04(m) および 3(deg) 程度であり, 数理的に機構運動を行った場合のシミュレーション結果 (2.5節) に比較すれば大きなものとなっている. しかしながら, 適応トラスにどのような動作を行わせればよいかに着目した, 誘導という全体計画としての面から見れば, ここで用いた適応トラスの規模をも勘案して, ほぼ所期の目標を達成できたと考えることができる. また, 最終姿勢において得られた評価規範 g^1および g^2の値は, それぞれ適用した場合の結果が他方の 1.10 倍および 1.28 倍となっており, ニューラルネットワークモデルによる評価規範に基づいた動作誘導法が効果的に働いていることが例示されている. 以上のシミュレーション結果から, 提案した



(a) 初期姿勢　(b) 評価規範 g^1による最終姿勢　(c) 評価規範 g^2による最終姿勢

図 4.8: 提案した手法に基づく適応トラスの動作結果

表 4.1: 動作評価規範および作業空間における誤差

適用した評価規範	得られた評価規範値* g^1	g^2	作業空間での誤差** 位置 (m)	方向 (deg)
g^1	1.00	1.28	0.03	3.13
g^2	1.10	1.00	0.04	2.78

* 評価規範値は適用した結果の値を用いて正規化した値.
** 作業空間における誤差は, $\|\boldsymbol{X}_W - \underline{\boldsymbol{X}_W}\|$ および $\|\boldsymbol{\Theta}_W - \underline{\boldsymbol{\Theta}_W}\|$ により評価した.

モジュール化構成の階層形ニューラルネットワークによる動作誘導手法の可能性を確認することができた.

4.5 おわりに

多くの機構的自由度を持つ機械システムである適応トラスに, どのような動作を行わせるのが適切であるかを考える動作誘導の問題点を, 階層形ニューラルネットワークを用いて行う手法について述べた. ニューラルネットワークの入出力関係の学習に用いられる誤差逆伝播法に着目し, 適応トラスの機構関係を学習したネットワークを用いて結合重みを固定した逆伝播を行うことによる, 目標作業空間を達成するための部材長の決定手法について述べた. 冗長な機構的自由度を有効に活用するための動作評価規範を表すニューラルネットワークと組み合わせることにより, 規範に基づいた動作誘導を同様の手法により取り扱うことができることを示した. 適応トラスは非常に多くの機構的自由度を持つため, このような手法のためのニューラルネットワークは必然的に巨大なものとなるが, 比較的小規模のニューラルネットワークのモジュール (ネットワークモジュール) から全体のニューラルネットワークを構成することを提案し, 適応トラスの機構学的構成に対応した, ニューラルネットワークの構成を示した. このようなモジュール化により, ニューラルネットワークの

学習処理の軽減と, 適応トラスの規模に対する柔軟な対応が可能となる.

提案した手法に基づき, 2 種類の評価規範に基づく動作誘導シミュレーションを行った. 得られた結果は, 目標とした作業空間をほぼ達成しており, 最終姿勢および評価規範の値は, 適用した動作評価規範の効果を明確に示している. これにより, 提案した手法の有効性を確認することができた. 適応トラスのような多自由度システムにどのような動作を行わせるかを考えるにあたっては動作評価規範が重要な働きをする. 本章ではこれが先見的に与えられた場合について議論したが, 次章ではその獲得を含め, 動作誘導そのものの柔軟性, 適応性について考えることとする.

また, 本章で提案した動作誘導手法の並列処理プロセッサによる実現について, 4.3節で導入したネットワークのモジュール化構成に着目した考察を付録 A.9節に示しておく.

第5章

動作評価規範の獲得と環境・条件への柔軟な適応

5.1 はじめに

本論文で取り扱っている適応トラスは, その作業空間に対して冗長な機構的自由度を持つ機械システムであり, それが置かれた環境・条件に柔軟に適応した動作を行うことが期待される. 本章では, 冗長な自由度を有効に活用する際に用いられる動作評価規範について考察し, 変化する環境・条件に適応するにはどのような動作を行えばよいかという側面について検討を加える. このような適応的な動作の誘導をも含め, 統合的に取り扱うため, 前章で提案したニューラルネットワークによる動作誘導手法を適用する.

冗長性を持つ機械システムの動作誘導は, 一般に, その動作を評価する何らかの規範に基づいて行われる. 例えば, 冗長ロボットアームの分野では, Manipulability[10][148], Dexterity Measure[51], Transmission Ratio[27], 動的可操作度[149], 特異姿勢の回避[118]などが提案され, 研究されている. 言うまでもなく, これらの評価規範はそれぞれ何らかの「良さ」の尺度を表すものであるが, Klein ら[51]が「器用さ (Dexterity) は直観的には明らかだが, 様々な解釈がある」と述べているように, これらの規範も様々な「良さ」の解釈に基づくものであり, あらゆる意味での「良さ」の尺度というわけではない. 単一ではなく複数の評価規範を折衷して適用する手

法についての報告も行われており, 例えば, 中村ら[85]はロボットに要求される動作を全てタスクとみなし, これらに優先順位を付けて処理を行う手法を提案しており, 田中ら[125]は, 複数の評価規範に基づく最適化をゲーム論的に行うことを提案している. しかしながら, このような手法においても, これらの動作評価規範はすべて数理的に記述される必要があり, また, 冗長な自由度を活用した動作の持つ多くの側面をどのような規範を用いて表現すればよいかについては, 全く直観的に行われねばならず, 全体としての十分な動作規範の表現を作ることは容易なことではない.

機械システムを取り巻く環境・条件は常に一定とは限らない. 整えられた環境である工場や研究所から外へ出た機械は, 時間や場所とともに変化する環境の中に置かれることになる[90]. このような状況下で機能を果たすためには, 機械システムのハードウェア, ソフトウェアの双方が環境・条件に対する生き物のような適応性を持つことが必要となる[129]. 言い換えれば, 機構的なロバスト性や環境の変化を捉えるセンサなどと共に, 動作誘導システム自体が自律的な適応性を持つことが望まれる[82]. ここでは, 適応トラスの動作試行を通じた動作評価規範の経験的・帰納的な獲得と獲得した規範に基づく動作誘導を, ニューラルネットワークを用いて行うことについて考察する. また, 適応トラスの置かれた環境・条件の変化に対する適応的動作についても動作誘導システムに用いたニューラルネットワーク構成の枠組みを用いて, 取り扱う考え方を示す.

5.2 動作評価規範の獲得

5.2.1 動作規範の選定における問題点

適応トラスの動作を評価する規範はさまざまな側面から考えられねばならない. 機械システムが柔軟な適応能力を発揮するためには, 状況に応

じた適切な規範の選択が重要となる.「どのような規範が最も適切か」といった問題の解は, 動作を評価するヒトの価値にほかならないが, これを合理的な手法により数理的に記述する方法論は現在のところ存在せず, 評価を行うヒトの直観に基づいて先見的に選択, 記述せざるを得ない. 適応トラスの動作を評価する規範が定まり, それを数学的形式で明確に記述することができれば, 評価規範に基づく動作誘導問題

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad g(\boldsymbol{L};\boldsymbol{S}) \quad \text{with respect to} \quad \boldsymbol{L} \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B) = \underline{\boldsymbol{W}} \end{aligned} \tag{4.21}$$

を解析的あるいは数値計算的な手順により解くことが可能となる. しかしながら, このような状況を期待することは一般的に難しく, 動作規範の選定に際しては以下に示すような点が問題となる.

複数評価規範の折衷手段　適応トラスの動作を評価する規範にはさまざまな側面が考えられるが, 一般に, これらすべてを同時に最適とすることはできないため, これらを総合的に評価するための個々の評価規範の折衷をどのようにして行うかが問題となる. これは多目的計画問題における重み付けやトレードオフをどのように決定するかが最終的な評価を行うヒトの判断として残されていることに対応している.

数理的な取り扱い　規範に基づく動作誘導問題 (4.21) を解く際に数理的な最適化手法を適用するためには動作評価規範の数理的な表現が必要となるが, すべての種類の規範についてこのような表現が可能なわけではない. 例えば定性的あるいは感覚的な側面が強い評価規範などでは数理的記述が容易でないことは直ちに理解できよう.

環境・条件に対する依存性　適切な動作評価規範は, 適応トラスの置かれる環境・条件ならびに果たすべき機能に大きく依存するが, この

ような状況が固定的で予め明らかとなっている場合は良いが, それが未知あるいは変化する場合には, 先見的に動作評価規範を定めることができない. 適応トラスが環境・条件に柔軟に適応した動作を行うためには, このような問題を解決することが重要となる.

5.2.2 ニューラルネットワークによる動作評価規範の獲得

前節で示した問題点に対処しつつ, 動作評価規範を構成する一つの方策として, 階層形ニューラルネットワークを用いて評価規範を獲得する手法について述べる. このための前提として, 次のような条件を想定する. すなわち,

前提条件 適応トラスのすべての動作に対し, 全体としてそれを評価する合理的なヒトが存在し, 動作誘導システムはその評価値を知ることができる. また, その評価は, 動作誘導システムが得ることのできる情報に何らかの因果関係により結び付けられている. なお, これを評価するヒトの持つ合理的な評価の因果関係は当然未知である.

この条件のもとで, ここでは動作規範の獲得を次のように考える.

動作評価規範の獲得 有限回の試行動作に基づき, 適応トラスの動作に対して与えられる評価を正しく判断するための規範を, 何らかの手段により動作誘導システムの内部に構成する. また, 与えられた環境・条件のもとで, 構成された評価規範に基づいた適応トラスの動作誘導を行うことを可能とする.

このような考え方に基づいた動作評価規範の獲得をニューラルネットワークを用いて行うことを考える. 4章で提案した動作誘導手法に用いた階層形のニューラルネットワークは, その基本的な特性として多数の入出力対

の標本から対応する入出力関係を学習により構成する能力を持つ (4.2.1節参照). この学習機能を利用して, 動作試行にもとづいた評価規範の獲得を行う. この概念図を図5.1に示す. すなわち, 適応トラスに対し, 種々の環境・条件を表すベクトル$\boldsymbol{S}$の設定のもとで, 適当な手法を用いて多様な部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$を生成する. これらの$\boldsymbol{L}$, $\boldsymbol{S}$および対応する節点位置$\boldsymbol{X}$ などの適応トラスの状態を表す量に基づいて評価者であるヒトが動作評価規範 gの値を決定し, 得られた入出力対$\boldsymbol{L}$, $\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{S}$, gを 4.2.2節 (2)で述べたニューラルネットワーク NNC に与え, 誤差逆伝播法を用いて学習を行う. このようにして構成した動作評価規範を表すニューラルネットワーク NNC を用いて 4.2.2節で提案した手法による動作誘導を行うことにより, 獲得した評価規範に基づいた適応トラスの動作が可能となる.

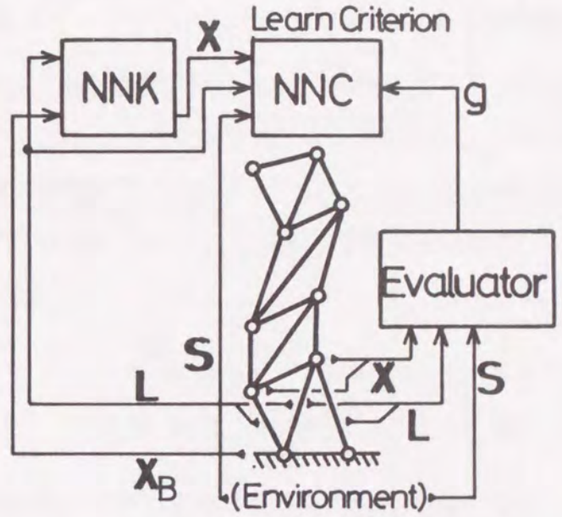


図 5.1: ニューラルネットワークを用いた動作評価規範の獲得の概念図

5.2.3 動作評価規範の獲得におけるネットワークのモジュール化構成

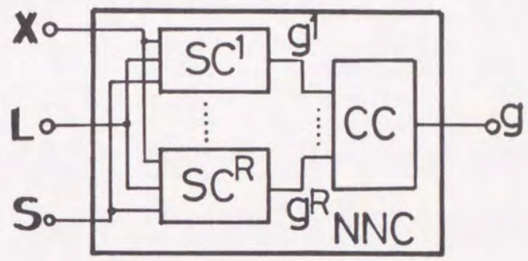
適応トラスは非常に多くの機構的自由度を持つため, 動作誘導システムに用いるニューラルネットワークも必然的に大規模なものとならざるを得ない. しかしながら, このような大規模なニューラルネットワークに全体としての学習を行わせることにより評価規範を獲得させることは非常に困難である. 本論文では, 4.3節において適応トラスの機構関係に着目したニューラルネットワーク NNK のモジュール化構成を提案し, また, 動作評価規範を表現するニューラルネットワーク NNC の場合にも同様のモジュール化構成が可能となることを示した. ここでは, 前節で述べたニューラルネットワークによる動作評価規範の獲得のための, 評価規範を表すネットワーク NNC のモジュール化構成について述べる.

(1) 動作評価規範の基本要素の考え方に基づくモジュール化

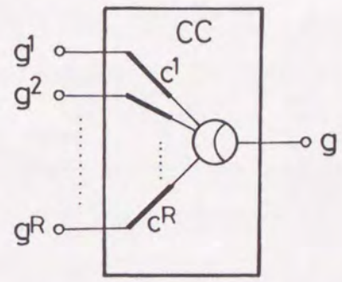
5.2.1節で述べたように, 適応トラスの動作を評価する規範にはさまざまな側面が存在し, これらを何らかの形で折衷することにより, 全体としての評価規範が構成される. すなわち, 全体としての評価規範 gは, 個々の側面に基づいて動作を評価する規範 $g^1, \cdots, g^R$を用いて次のように表すことができるとする.

$$\begin{aligned} g &= g(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S}) = \hat{g}(\boldsymbol{g}(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S})) \\ \boldsymbol{g} &= [g^1(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S}), \cdots, g^R(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S})]^T \end{aligned} \tag{5.1}$$

ここで, $g^1, \cdots, g^R$を動作評価規範の基本要素と呼び, $\boldsymbol{g}$はそれらをまとめた評価規範ベクトルである. また, $\hat{g}$はそれらを折衷するために導入されたスカラ関数であり, 多目的最適化手法における選好関数に相当する. 式 (5.1) の関係を反映したモジュール化構成による動作評価規範 gのためのニューラルネットワーク, NNC(4.2.2節参照) を図 5.2(a) に示す. 式 (5.1) における個々の動作評価規範の基本要素 g^rにネットワークモジュール SC^r(rth Single Criterion) が対応し, これらを折衷する関数$\hat{g}$にネットワークモジュール CC (Compromise Criterion) が対応する. このようなモジュール化構成により, 想定される動作評価規範の基本要素をあらかじめ SC^rとして準備することで規範獲得の際の学習処理を折衷のためのネットワークモジュール CC に限定し, 処理を大きく軽減することができる. 当然のこととして, 動作評価規範の表現にニューラルネットワークを



(a) 評価規範の基本要素による NNC のモジュール化



(b) 単一ニューロンによる折衷のためのネットワークモジュール CC

図 5.2: 動作評価規範の基本要素の導入によるモジュール化

用いていることから, 規範の基本要素 g^r の中には評価者であるヒトの感覚的あるいは直観的な因子を表現するものを含めることができる.

多目的数理計画における妥協処理として最も単純な手法である重み付け法に対応する折衷処理を行う場合には, 動作評価規範の基本要素を折衷する関数 $\hat{g}$ は線形関数

$$\begin{aligned} g &= \hat{g}(\boldsymbol{g}) = \hat{g}(g^1, \cdots, g^R) \\ &= \sum_{r=1}^{R} c^r g^r \end{aligned} \tag{5.2}$$

に帰着することができる. ここで, c^r は個々の動作評価規範の基本要素 g^r に対する重み係数である. このような場合には, 折衷のためのネットワークモジュール CC を図 5.2(b) に示すように単一のニューロンにより構成することができ, ネットワークモジュール CC を構成するニューロンの個々の結合重みが式 (5.2) における c^r に対応するものとなる.

(2) 適応トラスの機構学的構成に着目したモジュール化

4.3節で述べたように, 適応トラスの機構関係を表すニューラルネットワーク NNK は, 機構学的構成と同様のモジュール化により構成することができる. この点に着目し, 前節で述べた動作評価規範の基本要素を表すネットワークモジュール SC^r を NNK の場合と同様のモジュール化により構成することを考える.

適応トラスの機構関係式 (2.2)–(2.4) を参照し, これらのアナロジーとして, 前節で導入した動作評価規範の基本要素 g^r が次のように分割表記できると想定する.

$$g^r = g^r(\boldsymbol{L}, \boldsymbol{X}; \boldsymbol{S}) = \tilde{g}^r(\boldsymbol{g}_1^r, \cdots, \boldsymbol{g}_M^r) \tag{5.3}$$

$$\boldsymbol{g}_n^r = \boldsymbol{g}_n^r(\boldsymbol{s}_n) \tag{5.4}$$

$$\boldsymbol{s}_n = \boldsymbol{s}_n(\boldsymbol{L}_n, \boldsymbol{X}_n; \boldsymbol{s}_{n-3}, \boldsymbol{s}_{n-2}, \boldsymbol{s}_{n-1}, \boldsymbol{S}) \tag{5.5}$$

ここで, $\boldsymbol{g}_n^r$ および $\boldsymbol{s}_n$ はそれぞれトラスモジュール n に起因する動作評価規範の基本要素をまとめたベクトルおよび補助的な状態変数を表すベクトルであり, $\tilde{g}^r$ はこれらを適応トラス全体の量へと統合するための関数である. 式 (5.4) は, トラスモジュール n に関する動作評価規範の基本要素ベクトル $\boldsymbol{g}_n^r$ が, 補助状態変数 $\boldsymbol{s}_n$ によって表されることを示しており, 式 (5.5) の関係式は, $\boldsymbol{s}_n$ が機構関係式 (2.2) と同様の形式で表現されることを想定したものである. このような視点に基づく動作評価規範の基本要素 g^r に対応するネットワークモジュール SC^r のモジュール化構成を図 5.3 に示す. ネットワークモジュール CM_n^r(Criteria for truss Module n) が $\boldsymbol{g}_n^r$ に, ネットワークモジュール SM_n(State of truss Module n) が $\boldsymbol{s}_n$ に対応し, ネットワークモジュール UCM^r(Unify Criterion for truss Modules) は統合関数 $\tilde{g}^r$ に対応する. 本節で示したモジュール化においても, 前節の場合と同様に, 個々のネットワークモジュール毎に必要な関係を個別に準

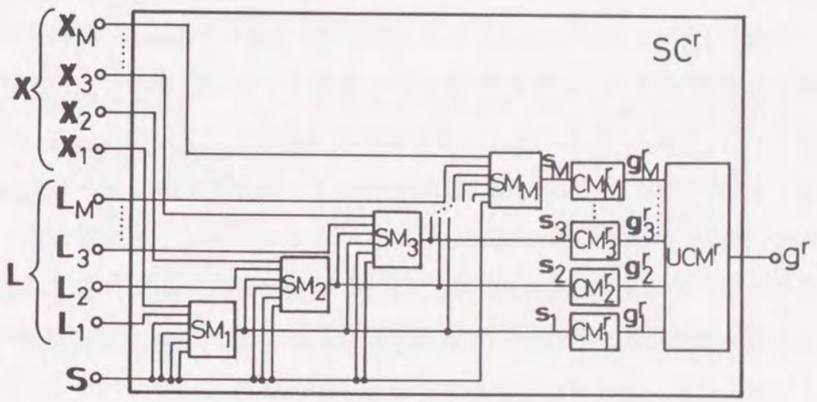


図 5.3: 機構関係を表すニューラルネットワーク NNK (図 4.5) とのアナロジーによる SC^r のモジュール化構成

備することにより, 学習処理を軽減することができる. すべてのトラスモジュールについて, 動作評価規範の基本要素ベクトル$\boldsymbol{g}_n^r$ あるいは補助状態変数ベクトル$\boldsymbol{s}_n$が同一の関係により表される場合もしくは同一であると想定する場合には, CM_n^rあるいはSM_nの結合重みをすべてのトラスモジュールに関して共有することができ, 規範獲得の際に調整する結合重みの数を著しく低減することもできる. また, 状況に応じてこれらのネットワークモジュールをさらに小規模のネットワークモジュールから構成することも同様にして可能である.

5.3 環境・条件の変化への柔軟な適応

適応トラスの動作の柔軟性のひとつとして, 作業に適した状態に整備がなされていない環境・条件の下であっても目的を達成するための動作を行うことが期待される. また, このような状況では環境・条件は常に一定であるとは限らないため, 動作誘導システムは変化する環境・条件に応じて適応トラスを適切に動作させることが求められる.

機械システムの動作を規定する要因には種々のものがあるが, それらは動作目的, 動作環境, 動作条件, 動作評価規範の 4 種に類別することができる. ここでは, これらの要因の変化に対する適応トラスの動作をニューラルネットワークを用いた動作誘導手法により統合的に取り扱う考え方について述べる. 4.2.2節で提案したニューラルネットワークによる動作誘導について考える. 図 5.4を参照すれば, 前節で述べた適応トラスの動作を規定する 4 種が, ニューラルネットワークを用いた動作誘導システムにおいて以下のように表されていることがわかる.

1. 動作目的　ニューラルネットワーク NNK の出力である作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$の目標値$\underline{\boldsymbol{W}}$.

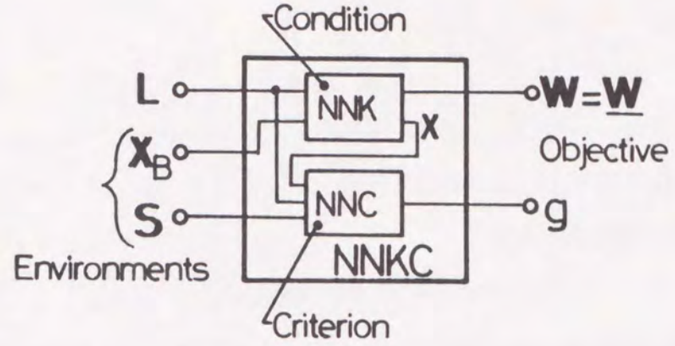


図 5.4: 適応トラスの動作を規定する要因のニューラルネットワーク表現

2. 動作環境　ニューラルネットワーク NNK の入力である適応トラスのベース位置$\boldsymbol{X}_B$ およびニューラルネットワーク NNC の入力である環境を表す量をまとめたベクトル$\boldsymbol{S}$.

3. 動作条件　ニューラルネットワーク NNK の入出力関係によって表される適応トラスの機構関係.

4. 動作評価規範　ニューラルネットワーク NNC の入出力関係によって表される動作評価規範.

先に 4.2.2節で提案したニューラルネットワークを用いた動作誘導 (ネットワーク NNKC(NNK および NNC) の順/逆方向伝播によって得られる部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$に対応する調整量を用いた適応トラスの動作) が行われている状況を考える. 誤差関数

$$E_{gW} = E_g + \eta E_W \tag{4.23}$$

にもとづいてネットワーク NNKC が逆伝播を行うことで得られる

$$\Delta \boldsymbol{v}^0_{\mathrm{NNKC}} = \gamma \begin{bmatrix} \dfrac{\partial E_{gW}}{\partial \boldsymbol{L}} \\ \dfrac{\partial E_{gW}}{\partial \boldsymbol{X}_B} \\ \dfrac{\partial E_{gW}}{\partial \boldsymbol{S}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{L} \\ \Delta \boldsymbol{X}_B \\ \Delta \boldsymbol{S} \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

を用いて, 部材長のみを

$$\boldsymbol{L} \leftarrow \boldsymbol{L} - \Delta \boldsymbol{L} \tag{4.14}$$

により繰り返し修正した結果, ネットワークは次のように特徴付けられる平衡状態へと達する. すなわち,

$$\Delta \boldsymbol{v}^0_{\mathrm{NNKC}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{O} \\ \Delta \boldsymbol{X}_B \\ \Delta \boldsymbol{S} \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

となり, 部材長の変化$\Delta \boldsymbol{L}$はゼロとなり適応トラスの動作は停止した状態となる. この時ネットワーク NNK の出力$\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK}}$のうち作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$に対応する$\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK(W)}}$は動作の目標値$\underline{\boldsymbol{W}}$と一致し, それによる誤差 E_W もゼロ

$$E_W = \frac{1}{2}(\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK(W)}} - \underline{\boldsymbol{W}})^T(\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK(W)}} - \underline{\boldsymbol{W}}) \simeq 0$$

となっている. これは厳密な意味ではなく, 評価規範に基づく動作誘導の場合にはペナルティ係数ηにより強調された E_Wの誤差による逆伝播量と E_gに起因する逆伝播量が, 入力層において$\Delta \boldsymbol{L}$への影響に関して相殺している状態

$$\eta \frac{\partial E_W}{\partial \boldsymbol{L}} + \frac{\partial E_g}{\partial \boldsymbol{L}} = \boldsymbol{O} \tag{5.8}$$

に対応している.

このような状態からの目的, 環境, 条件あるいは評価規範の変化に対する適応トラスの動作および動作誘導システムの適応は, 提案したニューラルネットワークを用いた手法において, 以下のようにして行うことができる.

1. 動作目的の変化に対する適応動作 (図 5.5(a))

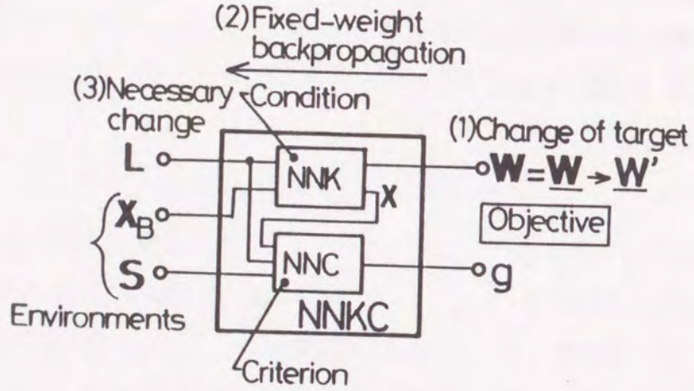
動作目的すなわち目標作業空間ベクトルが$\underline{\boldsymbol{W}}$から$\underline{\boldsymbol{W}'}$へと変化したならば, NNKC を構成するネットワーク NNK の$\boldsymbol{W}$に対応する出力に関する誤差は

$$E_W = \frac{1}{2}(\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK(W)}} - \underline{\boldsymbol{W}'})^T(\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK(W)}} - \underline{\boldsymbol{W}'})$$

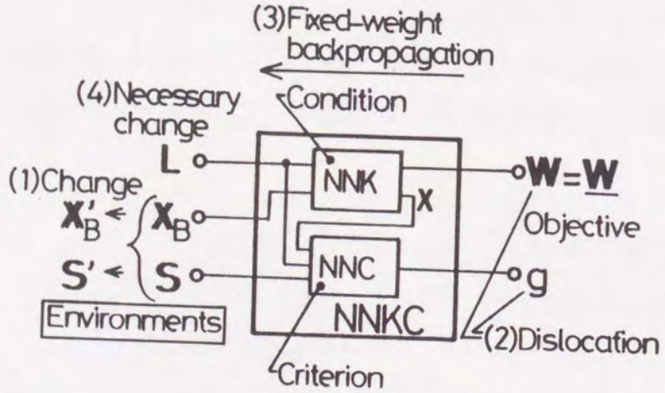
となり, ゼロではなくなる. これにより, 誤差関数 E_Wに起因する逆伝播が大きくなり, 式 (5.8) に示した平衡状態ではゼロであった部材長変化$\Delta \boldsymbol{L}$が再び非ゼロとなる. これは, 動作誘導ネットワークが平衡状態から離脱したことを示している. こうして行われる部材長の修正は, 4.2.2節で述べた規範に基づいた動作誘導の再起動にほかならず, 適応トラスがネットワーク NNKC により逆伝播された部材長$\boldsymbol{L}$の調整量に従う動作を行い, 新たな目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}'}$を達成することにより, 動作誘導ネットワークは再び平衡状態に到達し, 適応トラスは新たな姿勢で動作を停止する.

2. 動作環境の変化に対する適応動作 (図 5.5(b))

動作環境すなわちベース位置$\boldsymbol{X}_B$あるいは環境を表す変数$\boldsymbol{S}$が$\boldsymbol{X}'_B$および$\boldsymbol{S}'$へと変化した場合にも, これらの入力の変化がネットワーク NNKC を構成する NNK あるいは NNC を順伝播し, ネットワーク NNK の出力$\boldsymbol{v}^N_{\mathrm{NNK(W)}}$あるいはネットワーク NNC の出力 v^N_{NNC}を変化させることとなる. これは, 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$の目標値$\underline{\boldsymbol{W}}$からの離脱, ならびに評価規範値の最小値からの離脱をもたらし, これによる誤差関数 E_{gW}の変化に起因する逆伝播が生じることになる. この場合にも, 式 (5.8) に示した



(a) 目的 (目標作業空間ベクトル) の変化による動作誘導の再起動



(b) 環境の変化による動作誘導の再起動

図 5.5: 目的, 環境, 条件, 評価規範の変化への統一的な対応 (続く)

平衡状態ではゼロであった部材長変化$\Delta \boldsymbol{L}$が再び非ゼロとなり, 動作誘導ネットワークは平衡状態から離脱する. すなわち, 4.2.2節で述べた規範に基づいた動作誘導の再起動が行われることとなる. ネットワーク NNKC の入力層における部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$の調整量$\Delta \boldsymbol{L}$が再びゼロとなったとき, すなわち新たな環境の下で目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$を達成しつつ評価規範 gを最小とする状態で, 動作誘導システムは再び平衡状態に到達し, 適応トラスの動作は停止する.

3. 動作条件の変化に対する動作誘導システムの適応 (図 5.5(c))

適応トラスがその作業空間ベクトルや節点位置を観測するセンサを持つ場合には, 機構関係を表すニューラルネットワーク NNK の出力$\boldsymbol{W}$および$\boldsymbol{X}$とセンサによる観測値$\hat{\boldsymbol{W}}$および$\hat{\boldsymbol{X}}$とを比較することにより, 動作条件すなわち機構関係の変化を検出することができる. 適応トラスの機構関係が, ネットワーク NNK (を構成するネットワークモジュール TM および WV) が学習したものと等しい元来あるべき状態では, ネットワークの出力と観測値との誤差

$$\hat{E}_W = \frac{1}{2}(\boldsymbol{W}-\hat{\boldsymbol{W}})^T(\boldsymbol{W}-\hat{\boldsymbol{W}}) \tag{5.9}$$

$$\hat{E}_X = \frac{1}{2}(\boldsymbol{X}-\hat{\boldsymbol{X}})^T(\boldsymbol{X}-\hat{\boldsymbol{X}}) = \sum_{n=1}^{M}(\boldsymbol{X}_n-\hat{\boldsymbol{X}}_n)^T(\boldsymbol{X}_n-\hat{\boldsymbol{X}}_n) \tag{5.10}$$

は常にゼロである. しかしながら, 可変長部材の故障などにより機構関係が変化[1] した場合にはこれらの誤差が生じることとなり, ネットワーク NNK の入出力関係の再調節が必要となる. この場合には, 式 (5.9) あるいは (5.10) を誤差関数として, これらがゼロとなるようにネットワーク

[1] 動作誘導システムが部材長変化を要請しても部材長さが実際に変化しない場合には, 指定した部材長さに対応する節点位置が変化したととらえることができ, 機構関係が変化したものとして取り扱うことができる.

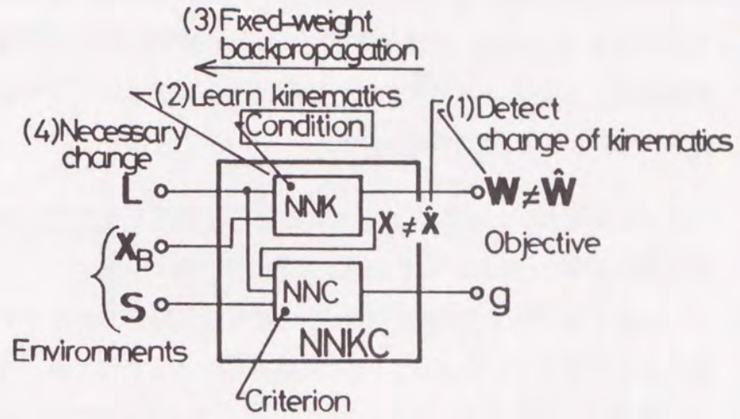
NNK の結合重み$\boldsymbol{w}_{\mathrm{NNK}}$を調節する誤差逆伝播学習 (4.2.1節参照) を行えばよい. このような適応手順は, すべての節点位置についてセンサが利用できない場合においても, 式 (5.10) の内それらのセンサに対応する項のみを用いることにより適用することができる. この場合には, 適応トラスの機構関係の変化により, センサに対応する節点を一致させるようにネットワーク NNK の調節が行われる. この後, 4.2.2節で述べた規範に基づいた動作誘導は, このように調節を施されたネットワーク NNK を用いて行われることとなる. ネットワーク NNKC の入力層における部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$の調整量$\Delta\boldsymbol{L}$が再びゼロとなったとき, すなわち新たな機構関係の下で目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$を達成しつつ評価規範 gを最小とする状態で, 動作誘導システムは再び平衡状態に到達し, 適応トラスの動作は停止する.

4. 動作評価規範の変化に対する動作誘導システムの適応 (図 5.5(d))

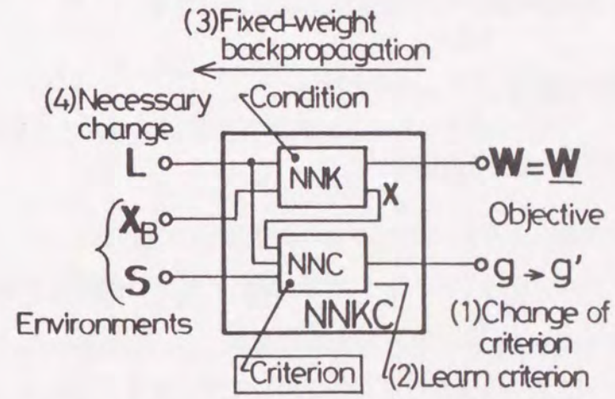
適応トラスの置かれた環境や 5.2節で述べた動作の評価者であるヒトの嗜好の変化により動作評価規範が変化した場合には, 動作評価規範を表すネットワーク NNC の出力 gと新たな規範に基づく望ましい評価規範値 g'との誤差

$$E'_g = \frac{1}{2}(g - g')^2 \tag{5.11}$$

を誤差関数としてこれがゼロとなるようにネットワーク NNC の結合重み$\boldsymbol{w}_{\mathrm{NNC}}$を調節する誤差逆伝播学習 (4.2.1節参照) を行えばよい. あるいは, ネットワーク NNC を 5.2.2節で述べた手順に従って再調節もしくは再構成することもできる. このような考え方にもとづけば, ネットワーク NNC が 5.2.3節 (1)に示す動作評価規範の基本要素に基づいたモジュール化構成となっている場合には, それらの規範の基本要素の折衷のためのネットワークモジュール CC のみの再調節も可能である. この後, 4.2.2



(c) 動作条件 (機構関係) の変化によるネットワーク NNK の再調節



(d) 動作評価規範の変化によるネットワーク NNC の再調節

図 5.5: 目的, 環境, 条件, 評価規範の変化への統一的な対応 (続き)

節で述べた規範に基づいた動作誘導は, このように再調節もしくは再構成されたネットワーク NNC を用いて行われることとなる. ネットワーク NNKC の入力層における部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$の調整量$\Delta\boldsymbol{L}$が再びゼロとなったとき, すなわち, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$を達成しつつ新たな動作評価規範 g'を最小とする状態で, 動作誘導システムは再び平衡状態に到達し, 適応トラスの動作は停止する.

以上において, 1 および 2 では結合重みを固定した調整量の逆伝播による動作誘導, 3 および 4 では通常の誤差逆伝播によるニューラルネットワークの結合重みの調節が, それぞれ順方向伝播と合わせて行われていることがわかる. このように, 4章で提案したニューラルネットワークによる動作誘導手法を用いることで, 動作を規定する要因である目的, 環境, 条件あるいは評価規範の変化に対する適応トラスの動作および動作誘導システムの適応の統一的な取り扱いが可能となる.

5.4 動作誘導シミュレーション

5.4.1 動作評価規範の獲得

5.2節で提案した手法に基づく動作評価規範の獲得シミュレーションの例を示す. 本シミュレーションでは, 適応トラスの動作を評価する規範の基本要素として, 以下の 5 つの指標を想定し, 図 5.2(b) に示した単一ニューロンにより構成される CC を用いて折衷することによる動作評価規範の獲得を行う.

(i) 基準姿勢からの部材長変化の指標

$$g^1 = \tilde{g}^1(g_1^1,\cdots,g_M^1) = \sum_{n=1}^{M} g_n^1$$

$$g_n^1 = \sum_{i=1}^{3}(l_{ni} - l_{ni}^{\mathrm{ref}})^2 \tag{5.12}$$

ただし, 上添字 ref は直立した基準姿勢における量を表す.

(ii) 基準姿勢からの節点位置変化の指標

$$\begin{aligned} g^2 &= \tilde{g}^2(g_1^2,\cdots,g_M^2) = \sum_{n=1}^{M} g_n^2 \\ g_n^2 &= \sum_{i=x,y,z}(x_{ni} - x_{n_i}^{\mathrm{ref}})^2 \end{aligned} \tag{5.13}$$

(iii) 部材長さの指標

$$\begin{aligned} g^3 &= \tilde{g}^3(g_1^3,\cdots,g_M^3) = \sum_{n=1}^{M} g_n^3 \\ g_n^3 &= \sum_{i=1}^{3} l_{ni} \end{aligned} \tag{5.14}$$

(iv) 基準姿勢からの幾何学的重心移動の指標

$$\begin{aligned} g^4 &= \tilde{g}^4(g_1^4,\cdots,g_M^4) = (\sum_{n=1}^{M}\boldsymbol{g}_n^4)^T(\sum_{n=1}^{M}\boldsymbol{g}_n^4) \\ \boldsymbol{g}_n^4 &= \boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_n^{\mathrm{ref}} \end{aligned} \tag{5.15}$$

(v) 基準姿勢からの幾何学的重心の水平方向の移動の指標

$$\begin{aligned} g^5 &= \tilde{g}^5(g_1^5,\cdots,g_M^5) = (\sum_{n=1}^{M}\boldsymbol{g}_n^5)^T(\sum_{n=1}^{M}\boldsymbol{g}_n^5) \\ \boldsymbol{g}_n^5 &= \begin{bmatrix} x_{nx} - x_{n_x}^{\mathrm{ref}} \\ x_{ny} - x_{n_y}^{\mathrm{ref}} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5.16}$$

これらの動作評価規範の基本要素における補助状態変数$\boldsymbol{s}_n$は, 次のような量により構成される.

$$\boldsymbol{s}_n = [\boldsymbol{L}_n^T, \boldsymbol{X}_n^T, (\boldsymbol{L}_n^{\mathrm{ref}})^T, (\boldsymbol{X}_n^{\mathrm{ref}})^T]^T \tag{5.17}$$

個々の評価規範の基本要素を表すネットワークモジュール SC^{r}は, 4.3.2節で導入した評価規範 g^1および g^2の場合と同様に, ネットワークモジュール SD, ADD 等を用いて構成することができる.

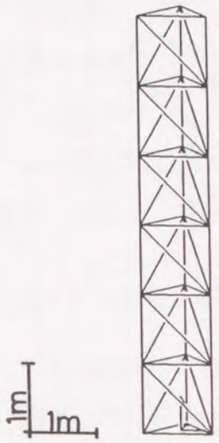
以上の動作評価規範の基本要素の下で, 18 モジュールの適応トラスを用いて規範の獲得シミュレーションを行う. ネットワークモジュール CC の学習のための試行動作は, ランダムに選択した初期姿勢から, CC の結合重みをランダムに決定した場合に基づいて動作誘導を行うことにより生成した. ネットワークモジュール CC には, このようにして生成した 30 の学習パターンを評価者であるヒトがその形態を評価して主観的に採点したものを, 2000 回繰り返して学習させた.

図 5.6(b)–(f) に個々の動作評価規範の基本要素を表すネットワークモジュール SC^1–SC^5単独で構成した評価規範ネットワーク NNC を NNK と組み合わせた動作誘導ネットワーク NNKC を用いて図 5.6(a) に示す直立状態の初期 (基準) 姿勢 ($\boldsymbol{W}^0$ ($= \boldsymbol{W}^{\mathrm{ref}}$) = [0, 0, 6(m), 0, 0, 0(deg)]^T) から目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$ = [1.5, 0, 5.5(m), 0, 30, 0(deg)]^T を達成する動作誘導を行った結果を示す. 提案した手法により学習させた折衷のためのネットワークモジュール CC を用いた獲得した動作評価規範に基づく動作誘導結果を図 5.6(g) に示す. また, 得られた評価規範の基本要素の値を最小値で正規化したものとその個々の値を観測された評価規範毎に比較するために求めた偏差値を表 5.1に示す.

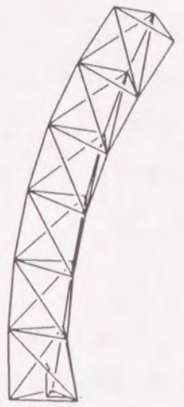
図 5.6および表 5.1から, 提案した手法により折衷した動作評価規範 gは

表 5.1: 正規化した評価規範の値と偏差値

適用規範	図 5.6	観測された評価規範 (偏差値)				
		g^1	g^2	g^3	g^4	g^5
g^1	(b)	1.00(39)	1.18(58)	1.08(49)	5.07(59)	5.36(59)
g^2	(c)	1.22(42)	1.00(40)	1.10(51)	3.50(51)	3.76(52)
g^3	(d)	3.54(66)	1.25(65)	1.00(31)	5.90(64)	6.29(63)
g^4	(e)	2.44(55)	1.08(48)	1.13(58)	1.00(39)	1.02(40)
g^5	(f)	2.23(52)	1.08(48)	1.13(57)	1.42(41)	1.00(40)
g	(g)	1.56(45)	1.01(41)	1.10(53)	2.35(46)	2.36(46)

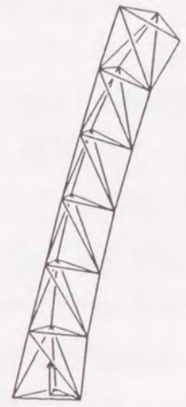


(a) 直立した初期姿勢



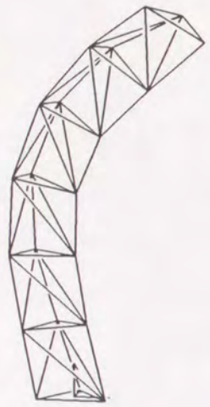
(b) 部材長変化の規範 g^1に基づく姿勢

(c) 節点位置変化の規範 g^2に基づく姿勢



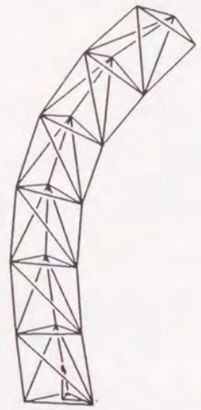
(d) 部材長の規範 g^3に基づく姿勢

図 5.6: 動作誘導結果 (続く)



(e) 重心の移動の規範 g^4に基づく姿勢

(f) 重心の移動 (水平) の規範 g^5 に基づく姿勢



(g) 獲得した評価規範 gに基づく姿勢

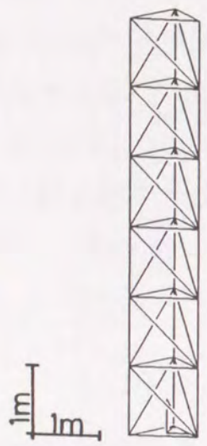
図 5.6: 動作誘導結果 (続き)

規範の基本要素 g^1, g^2, g^4, g^5については偏差値も 50 より小さく, これらの影響を受けていることがわかる. 特に規範要素 g^2(偏差値 41) についての影響が大きいことが示されている. また, その形態の様子からは g^4あるいは g^5の重心の移動の規範の影響も認められる. この結果から, このシミュレーションにおける評価者の潜在的な嗜好は節点の移動を抑えることにあることがわかり, それに基づく動作誘導システムがニューラルネットワークを用いて実現されていることになる.

5.4.2 環境・条件の変化に適応した動作

5.3節で述べた考え方に基づいた適応トラスの目標作業空間および環境・条件への適応動作のシミュレーションについて示す. 動作評価規範としては, 前節で述べた規範のうち重心の移動の規範 g^4を用いる. シミュレーションの初期 (基準) 姿勢を図 5.7(a) に示す. これは目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$ $(= \boldsymbol{W}^{\mathrm{ref}})$ =[0, 0, 6(m), 0, 0, 0(deg)]^{T}に対応した状態である. この状態から目標作業空間ベクトルが$\underline{\boldsymbol{W}'}$ =[0.5, 0, 5(m), 0, −30, 0(deg)]^T まで変化した場合に, 動作目的の変化に対する適応動作を行った結果の適応トラスの姿勢が図 5.7(b) である. この状態で, 環境として与えられているベース位置$\boldsymbol{X}_B$が y軸回りに 30(deg) 回転し$\boldsymbol{X}'_B$となった場合の環境への適応の様子を図 5.7(c) に示す. また, 図 5.7(d) は, 部材が故障した場合に作業空間と 5 つの節点位置を観測するセンサの情報を用いて機構関係を表すニューラルネットワーク NNK の入出力関係を調節しつつ, 初期姿勢から目標作業空間を達成する動作を行った結果である.

これらの結果の姿勢は, 環境・条件の変化にかかわらず, 目的を達成する動作の誘導が適用した評価規範に基づいて行われたことを示しており, 提案した手法による環境・条件の変化への適応機能を持つ動作誘導シス



(a) 初期姿勢

(b) 変化した目標作業空間の達成

(c) ベース位置の変化への適応

(d) 部材の故障への適応例 ('//' は故障部材, •はセンサを示す)

図 5.7: 目標作業空間および環境・条件への適応動作 (動作評価規範 g^4に基づく)

テムが構築できることを示している.

5.5 おわりに

本章では動作誘導システムをニューラルネットワークを用いて構成することによる評価規範の獲得ならびに環境・条件の変化に対する適応について述べた.

冗長な機械システムの動作誘導において, その動作を特徴づける評価規範は重要な役割を果たす. 5.2節では, 階層型のニューラルネットワークの基本的な特徴である学習機能を利用し, 動作試行に対して評価者であるヒトにより決定される評価値から, ネットワークの入出力関係としての評価規範を学習により獲得することについて述べた. 動作評価規範を表現するニューラルネットワークにおける, 評価規範の基本要素の考え方に基づくモジュール化および機構学的構成とのアナロジーに基づいたモジュール化を示した. 評価規範ネットワークのこのようなモジュール化構成により, 規範獲得の際の学習処理の軽減および適応トラスの規模などに柔軟に対応したネットワークの構成が期待できる.

環境・条件の変化に対する適応も機械に期待される柔軟な機能のひとつである. このような適応性を発揮するためには, 機械システムのハードウェアと共にその動作を生成するソフトウェアにも柔軟な適応能力が求められる. 5.3節では, 変化する環境・条件の下での適応トラスの動作ならびに動作誘導システムの適応について考察した. 4章で提案したニューラルネットワークによる動作誘導手法を用いることにより, 適応トラスの動作を規定する種々の要因の変化への対応を, ニューラルネットワークの順/逆方向伝播により統一的に取り扱うことができることを示した.

動作評価規範の獲得および環境・条件の変化への適応をシミュレーショ

ンにより検証し, 提案したこれらの手法の有効性を確認した.

幾何形態に着目した評価のみを例としたが, 動力学特性, 構造安定性などの力学的因子を評価の中に入れることが実際には重要となる. これらの因子を考慮した評価規範も, 本章で示したニューラルネットワークの枠組みで取り扱うことは可能であり, 具体的な応用に向けての議論は継続する必要がある.

第6章

システムとしての実現に向けて

6.1 はじめに

適応トラスは機構的には並列リンクメカニズムであり, また, 多くの自由度を保有するため, 機構的に直列を基本とし, 保有する自由度も数自由度程度である既存の多くの機械システムと異なるさまざまな側面を持つ. 本章ではこれらの側面を考慮し, 適応トラスをシステムとして実現する際に検討することが必要となるいくつかの問題について議論を行う.

適応トラスを柔軟ロボットアームや宇宙用クレーンなどの用途に用いる場合には, 作業空間における可到達性についての検討が必要である. ロボットアームの可動範囲についての報告[60][63][64][132][133][143] がなされているが, それらは数自由度程度の直列型のロボットアームを取り扱ったものであり, 高多自由度・高冗長の並列メカニズムである適応トラスに対してそのまま適用することはできない. ここでは, このような適応トラスに対して適用することができる作業空間における可到達範囲の探索手法を提案し, 2.3節で導入した実モデルへの適用を示す.

適応トラスは機構運動のためのアクチュエータを持つ可変長部材を非常に多く保有する. 適応トラスのこのような側面に着目した動作制御の統計学的アプローチについて考える. 本章では, 個々の可変長部材がその特性にばらつきあるいは不具合を持つ場合においても全体としては目標

とする作業空間を達成することができることを示す.

機構的な形態の一意性という観点から, 2章および3章では部材を接続するジョイントを持つ節点ブロックを縦部材の一部とすることにより, 概念モデルと同じ構造としての静定性を確保した実モデルに基づいて議論を行ったが, 節点ブロックをどの部材とも一体化せず独立とし, すべての部材を同等とする構成の実モデルを考えることもできる. このような構成の実モデルは静定構造条件を保てないため, 部材長が固定された状況でも構造形態が一意に定まらないが, 適当なポテンシャル場の下では安定な形態をとることができる. 本章では, このような状況における安定化形態についても考察する.

6.2 作業空間における可到達性

ロボットアームなどの機械システムにおいて, 作業空間における可到達範囲は機構学的な性能評価の指標のひとつであり, これまでにもいくつかの報告がなされている. 例えば, Kumar ら[60]はマニピュレータの可動範囲をシミュレーションによる手先部の牽引により求めることを提案しており, Yang[143]および Lee[63]は, マニピュレータの作業空間の特性についての評価を行っている. また, 2 あるいは 3 リンクのロボットアームにおける可動範囲のシミュレーションによる探索[64][132]や, 任意の平面に関する作業空間の輪郭をプロットするアルゴリズム[133]も報告されている. しかしながら, これらは主として数自由度程度の直列型のロボットアームを取り扱ったものであり, 非常に多くの機構的自由度を持つ機械システムである適応トラスの可到達性をこれらの手法により議論することはできない. ここでは, このような高多自由度・高冗長性を有する機械システムである適応トラスの作業空間における可到達範囲の探索手法を

提案する. 可変長部材の伸縮範囲と節点部において部材を接続するジョイントの回転角範囲を制約条件とする適応トラスの実モデルへの適用を示す.

6.2.1 可到達性の判定

(1) 増分形の記述による問題の定式化

適応トラスの実モデルにおいて, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$が到達可能かどうかは次の問題

$$\text{Find} \quad \boldsymbol{L} \quad \text{such that} \quad \begin{cases} \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B,\boldsymbol{Q}_B)=\underline{\boldsymbol{W}} \\ \boldsymbol{C}_{\text{Lower}} \le \boldsymbol{C}(\boldsymbol{L}) \le \boldsymbol{C}_{\text{Upper}} \end{cases} \tag{6.1}$$

の解が存在するかどうかによって判定することができる. ここで, $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{L})$は適応トラスの可到達範囲を制限する種々の要因 (可変長部材の伸縮範囲, ジョイントの回転角範囲, 障害物の有無など) に基づく制約条件を表す部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$の関数であり, $\boldsymbol{C}_{\text{Lower}}$および$\boldsymbol{C}_{\text{Upper}}$は制約関数の下限値および上限値を表す. 適応トラスの実モデルのように多くの機構的自由度を持ち, 非線形の制約関数を持つ場合には問題 (6.1) の解空間を直接求めることは非常に困難である. そこで, 問題 (6.1) の増分形表記を用いて, 適応トラスの現在の姿勢における作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}^{(t)}=\boldsymbol{W}(\boldsymbol{L}^{(t)};\boldsymbol{X}_B,\boldsymbol{Q}_B)$から$d\boldsymbol{W}^{(t)}$移動した点$\boldsymbol{W}^{(t+1)}=\boldsymbol{W}^{(t)}+d\boldsymbol{W}^{(t)}$の到達可能性の判定問題

$$\text{Find} \quad d\boldsymbol{L}^{(t)} \quad \text{such that} \quad \begin{cases} \boldsymbol{J}^{WL}d\boldsymbol{L}^{(t)}=d\boldsymbol{W}^{(t)} \\ \boldsymbol{C}_L^{(t)} \le \boldsymbol{J}^{CL}d\boldsymbol{L}^{(t)} \le \boldsymbol{C}_H^{(t)} \end{cases} \tag{6.2}$$

を考える. ここで,

$$\boldsymbol{J}^{CL}=\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{L}} \tag{6.3}$$

であり,

$$\boldsymbol{C}_L = \boldsymbol{C}_{\mathrm{Lower}} - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{L}^{(t)}) \tag{6.4}$$

$$\boldsymbol{C}_H = \boldsymbol{C}_{\mathrm{Upper}} - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{L}^{(t)}) \tag{6.5}$$

である. 適当な初期姿勢$\boldsymbol{L}^{(0)}$から出発し, 問題 (6.2) の解 $d\boldsymbol{L}^{(t)}$を用いて

$$\boldsymbol{L}^{(t+1)} = \boldsymbol{L}^{(t)} + d\boldsymbol{L}^{(t)} \tag{6.6}$$

とすることにより可到達範囲の探索を逐次的に行う.

(2)　可到達性判定問題 (6.2) における解の探索

増分形の可到達性判定問題 (6.2) の解の探索は, 適当な表記の変更を行うことにより, 線形計画法におけるシンプレックス法第一段階の実行可能解の探索[110]に帰着することができる. しかしながら, 適応トラスが多くの冗長自由度を持つ場合にはその実行可能解を得るための計算量 (サイクル数) は可変長部材の部材数 (機構的自由度) と制約条件の数との組み合わせのオーダに比例して非常に大きなものとなる. ここでは, 提案した手法が増分形で表されている点に注目した, 問題 (6.2) の解の探索手法を示す.

[問題 (6.2) の解の探索]

1. 次のような初期値を持つ等式制約行列$\boldsymbol{J}^{CL^*}$および制約値ベクトル $d\boldsymbol{C}^*$を準備する.

$$\boldsymbol{J}^{CL^*} = \boldsymbol{J}^{WL} \tag{6.7}$$

$$d\boldsymbol{C}^* = d\boldsymbol{W}^{(t)} \tag{6.8}$$

2. 等式制約行列$\boldsymbol{J}^{CL^*}$の疑似逆行列[105]$(\boldsymbol{J}^{CL^*})^-$を用いて

$$d\boldsymbol{L}^{(t)} = (\boldsymbol{J}^{CL^*})^- d\boldsymbol{C}^* \tag{6.9}$$

として解候補 $d\boldsymbol{L}^{(t)}$を定める.

3. 解候補 $d\boldsymbol{L}^{(t)}$が不等式制約をすべて満たせば, これを解として探索を終了する.

4. 不等式制約のうち$d\boldsymbol{L}^{(t)}$によって満たされないものに対応する$\boldsymbol{J}^{CL}$の行および$\boldsymbol{C}_L$あるいは$\boldsymbol{C}_H$の値を集めた行列およびベクトルを$\boldsymbol{J}^{CL'}$および$\boldsymbol{C}'$とし, 等式制約行列$\boldsymbol{J}^{CL^*}$および制約値ベクトル $d\boldsymbol{C}^*$を次のように更新する.

$$\boldsymbol{J}^{CL^*} \leftarrow \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}^{CL^*} \\ \boldsymbol{J}^{CL'} \end{bmatrix} \tag{6.10}$$

$$d\boldsymbol{C}^* \leftarrow \begin{bmatrix} d\boldsymbol{C}^* \\ \boldsymbol{C}' \end{bmatrix} \tag{6.11}$$

5. 制約値ベクトル $d\boldsymbol{C}^*$の次数が適応トラスの可変長部材数 (機構的自由度) より大きい場合には, 問題 (6.2) は解を持たないとして探索を終了する.

6. 新たな等式制約行列$\boldsymbol{J}^{CL^*}$および制約値ベクトル $d\boldsymbol{C}^*$を用いて, 処理を手順 2より繰り返す.

この手法は, 問題 (6.2) における解の探索を, 有効な不等式制約の探索に帰着することにより行っている. すべての有効な不等式制約が明らかになれば, それらを等式制約に置き換えることにより, 制約を満たす解を得ることができる. すなわち, 等式制約を満たす増分 $d\boldsymbol{L}^{(t)}$を疑似逆行列により生成し (手順 2), これによって許容範囲を越える不等式制約を有効

な制約と見なし, それらを次々に等式制約に置き換える (手順 4) ことにより, すべての有効な制約を見いだす. その結果得られた有効な制約の数により解の存在可能性の判定を行い (手順 5), 有効な制約が付加されない状態になれば解が得られたことになる (手順 3). このような手法を行うためには初期状態$\boldsymbol{L}^{(0)}$がすべての制約を満たしていることと増分形の制約条件の記述とが必要となるが, 1 ステップにおける繰り返しは, 最大でも (適応トラスの機構的自由度 − 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$の次数) 回となる.

式 (6.2) の問題は, 不等式制約を片側制約に書き改めることにより

$$\begin{aligned} \boldsymbol{J}^{WL} d\boldsymbol{L}^{(t)} &= d\boldsymbol{W}^{(t)} \\ \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}^{CL} \\ -\boldsymbol{J}^{CL} \end{bmatrix} d\boldsymbol{L}^{(t)} &\leq \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_H^{(t)} \\ \boldsymbol{C}_L^{(t)} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{6.2'}$$

なる制約条件を有する線形計画問題の実行可能解$d\boldsymbol{L}^{(t)}$を求める問題と等価であるから, シンプレックス法の第一段を行うことによりその解を見つけることが可能である. この場合の計算量は, 最悪の場合には (適応トラスの機構的自由度 + 不等式制約の数 × 2) から (不等式制約数 × 2 + 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$の次数) を選ぶ組み合わせとなり, そうでない場合でもかなりの繰り返し計算 (サイクル) が必要となることから, ここで考えた方法はシンプレックス法第一段階に比較して計算量を大きく軽減することができる.

6.2.2 制約関数の定式化

障害物が存在しない空間を考えれば, 適応トラスの実モデルの場合に制約条件として考慮しなければならないのは, 可変長部材の伸縮範囲および部材相互を接続するジョイントの回転角範囲である[1]. したがって, 制

[1] 厳密には, 部材相互の干渉やトラスモジュールが力学的に安定でなければならない, などの条件も考慮する必要があるが, これらの条件は可変長部材の伸縮範囲がそれほど大きくない場合には問題とはならない.

約関数$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{L})$とその下限値$\boldsymbol{C}_{\text{Lower}}$および上限値$\boldsymbol{C}_{\text{Upper}}$は,

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{L}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L} \\ \boldsymbol{\Lambda}(\boldsymbol{L}) \end{bmatrix} \tag{6.12}$$

$$\boldsymbol{C}_{\text{Lower}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{\text{Min}} \\ \boldsymbol{\Lambda}_{\text{Min}} \end{bmatrix} \tag{6.13}$$

$$\boldsymbol{C}_{\text{Upper}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{\text{Max}} \\ \boldsymbol{\Lambda}_{\text{Max}} \end{bmatrix} \tag{6.14}$$

と表される. ただし,

$$\boldsymbol{\Lambda} = [\lambda_{n,a},\ (n = -2, \cdots, M;\ a = -2, -1, 1, 2, 3;\ -2 \leq n + a \leq M)]^T \tag{6.15}$$

は部材を接続するジョイント $[n, a]$(2.3.2節参照) の中立軸からの回転角度$\gamma_{n,a}$(図 6.1参照) の余弦

$$\lambda_{n,a} = \begin{cases} \boldsymbol{e}_{n,a}^T(-\boldsymbol{e}_{n(4+a)}) & (a = -2, -1) \\ \boldsymbol{e}_{n,a}^T \boldsymbol{e}_{(n+a)(4-a)} & (a = 1, 2, 3) \end{cases} \tag{6.16}$$

をまとめたものであり, $\boldsymbol{\Lambda}_{\text{Min}}$および$\boldsymbol{\Lambda}_{\text{Max}}$は, それぞれ回転角範囲に対応する余弦をまとめたものである. ここで,

$$\boldsymbol{e}_{n,a} = \boldsymbol{Q}_n \boldsymbol{e}_{n,a}^{(n)} \tag{6.17}$$

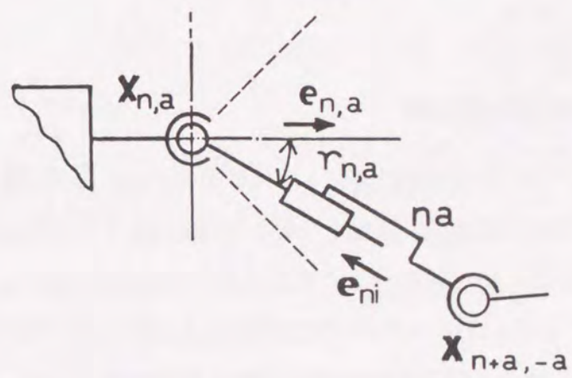


図 6.1: 部材を接続するジョイント $[n, a]$ の回転角範囲

は節点座標系 C_n(2.3.2節参照) を参照したジョイント n,a の中立軸方向単位ベクトル$\boldsymbol{e}_{n,a}^{(n)}$(定数) を全体座標系 Cに変換したものであり,

$$\boldsymbol{e}_{ni} = \frac{\boldsymbol{X}_{n,-4+i} - \boldsymbol{X}_{n-4+i,4-i}}{l_{ni}} \tag{6.18}$$

は全体座標系 Cを参照した部材 ni の軸方向単位ベクトルである. ただし, ジョイントの回転角範囲はその中立軸に関して対称であるとしている.

制約関数のヤコビ行列は,

$$\boldsymbol{J}^{CL} = \frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{L}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{(3M)(3M)} \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{\Lambda}}{\partial \boldsymbol{L}} \end{bmatrix} \tag{6.19}$$

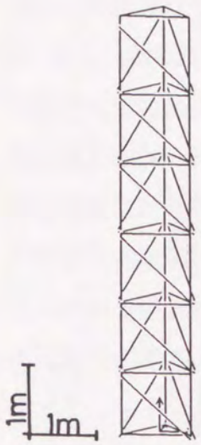
となる. ここで,

$$\frac{\partial \boldsymbol{\Lambda}}{\partial \boldsymbol{L}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \lambda_{-2,1}}{\partial \boldsymbol{L}_1} & \cdots & \dfrac{\partial \lambda_{-2,1}}{\partial \boldsymbol{L}_M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{\partial \lambda_{M,-1}}{\partial \boldsymbol{L}_1} & \cdots & \dfrac{\partial \lambda_{M,-1}}{\partial \boldsymbol{L}_M} \end{bmatrix} \tag{6.20}$$

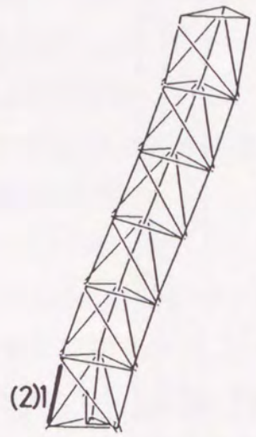
はジョイント回転角と部材長ベクトルの間の増分関係を表すヤコビ行列である. 式 (6.20) における$\partial \lambda_{n,a}/\partial \boldsymbol{L}_j$ の詳細については付録 A.6.1節に示す.

6.2.3 可到達限の探索例

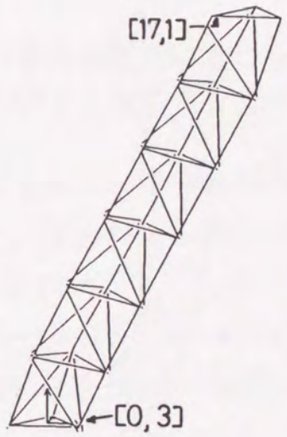
18 モジュール・51 自由度の適応トラスの実モデルの可到達限の探索例を図 6.2および図 6.3に示す. 節点オフセットの値は表 2.1に示した値を用い, 図 6.2および図 6.3の (a) に示した直立状態の初期姿勢 ($\boldsymbol{W}^0$ = [0,0,6(m), 0,0,0(deg)]^T においてすべての可変長部材およびジョイントが中立状態となるとする. 縦および横部材の伸縮範囲は中立位置から±0.15(m), 斜め部材の伸縮範囲は±0.2(m) とし, 各回転ジョイントの回転角範囲は中立軸



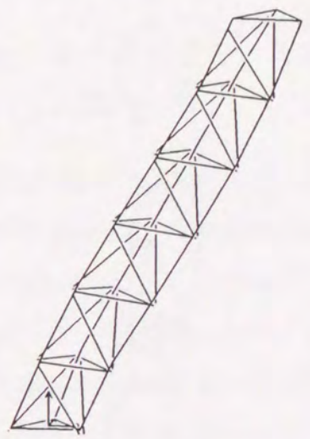
(a) 初期姿勢 ($x_{Wx} = 0$(m))



(b) 部材 (2)1 の伸縮長が有効な制約となる ($x_{Wx} = 1.9$(m))

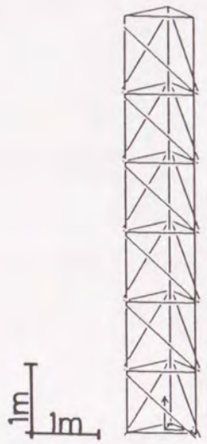


(c) ジョイント [0,3], [17,1] の回転角が有効な制約となる ($x_{Wx} = 2.9$(m))

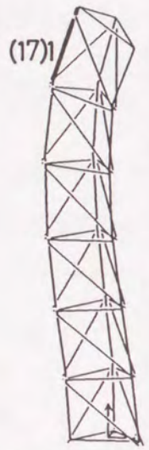


(d) 可到達限 ($x_{Wx} = 3.2$(m))

図 6.2: 18 モジュールの適応トラスの x 軸方向の可到達限の探索



(a) 初期姿勢 ($\theta_{Wy} = 0$)



(b) 部材 (17)1 の伸縮長が有効な制約となる ($\theta_{Wy} = 36(\mathrm{deg})$)

(c) ジョイント [15,2] の回転角が有効な制約となる ($\theta_{Wy} = 44(\mathrm{deg})$)

(d) 可到達限 ($\theta_{Wy} = 60(\mathrm{deg})$)

図 6.3: 18 モジュールの適応トラスの y軸回りの回転の可到達限の探索

から 25(deg) とする. 初期姿勢からの作業空間における x 軸方向の並進運動の可到達限を各ステップの増分 0.1(m) で探索を行った結果を図 6.2 に, また, y軸回りの回転運動の可到達限を各ステップの増分 2(deg) で探索を行った結果を図 6.3に示す. それぞれの結果において, (b) に示す姿勢は疑似逆行列に基づく増分運動によって最初に可変長部材の伸縮範囲が有効な制約となった状態, (c) に示す姿勢は最初にジョイントの回転角範囲が有効な制約となった状態である. それぞれの運動における可到達限における姿勢を (d) に示す. これらの結果から, 適応トラスの実モデルの可到達範囲については, 可変長部材の伸縮範囲だけではなく, 部材を接続するジョイントの回転角範囲も重要な因子となることがわかる. また, 並列メカニズムは一般にその可動範囲が小さいことが指摘されているが[69], 適応トラスのような構成とすることでかなり大きな可到達範囲を持つことがわかる.

6.3 高多自由度性に着目したアクチュエータのばらつきを許容する適応トラスの動作

一般に, 機械システムの動作は個々の自由度の動きが正確であることを前提として行われる. したがって, 機械システム全体としての目的の達成のためには個々のアクチュエータすべての精度が重要となり, 個々のアクチュエータが正確な動作を行うための多数のセンサや制御装置などが必要となる. しかしながら機械システムの動作はその作業を記述する空間において目標点を達成できたか否かによって評価されるべきものであり, 個々のアクチュエータの動きの正確さによって評価されるべきものではない. 機構的な冗長性を持たない機械システムにおいては個々のアクチュエータの特性のばらつきはそのまま作業空間に反映されるが, 本論

文で取り扱っている適応トラスは機構運動のための可変長部材を非常に多く保有するため, 個々の可変長部材がその特性にばらつきあるいは不具合を持つ場合においても作業空間における目標点を達成することができる可能性を持つ. ここでは, 適応トラスのこのような側面に着目した動作について考える.

6.3.1 統計的な視点からのアプローチ

(1) 可変長部材の特性

可変長部材のアクチュエータが精度を保つための個々の制御装置等を持たない場合を考え, 部材 ni に$\underline{dl_{ni}}$なる部材長変化が要請された時, 実際に達成される部材長の変化量 dl_{ni}が平均

$$E(dl_{ni}) = m_{ni}\underline{dl_{ni}} \tag{6.21}$$

標準偏差あるいは分散

$$S(dl_{ni}) = s_{ni}\underline{dl_{ni}} \tag{6.22}$$

$$V(dl_{ni}) = s_{ni}^2\underline{dl_{ni}}^2 \tag{6.23}$$

に従う確率変数で特徴付けられると仮定する. ここで, 係数 m_{ni}および s_{ni}は可変長部材 ni の特性を表すパラメータである. 係数 m_{ni}は部材長変

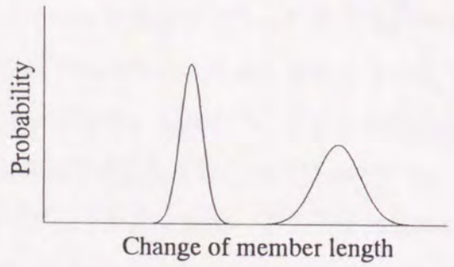


図 6.4: 可変長部材の部材長変化の特性

化の調節におけるバイアスを示すものであり, 係数 s_{ni}は部材長が変化するに従い誤差が線形的に累積されるというモデルを表すものである. このような部材長変化の特性は図 6.4に示すようなばらつきを表すものである.

(2) 部材長変化による作業空間における動作の期待値と分散

可変長部材の部材長変化のばらつきにより, 適応トラス全体としての動作も決定論的なものではなく, ばらつきを持つものとなる. 可変長部材の特性を式 (6.21) および式 (6.22) あるいは (6.23) に示すように確率変数としてモデル化を行うことにより, 要請された部材長変化ベクトル$\underline{d\boldsymbol{L}} = [\underline{d\boldsymbol{L}_1}, \cdots, \underline{d\boldsymbol{L}_M}]^T$, $\underline{d\boldsymbol{L}_n} = [\underline{dl_{n1}}, \underline{dl_{n2}}, \underline{dl_{n3}}]^T$ によって達成される作業空間ベクトルの変化 $d\boldsymbol{W} = [x_{Wx}, x_{Wy}, x_{Wz}, \theta_{Wx}, \theta_{Wy}, \theta_{Wz}]^T$(2.4節参照) は平均

$$\begin{aligned} E(d\boldsymbol{W}) &= \boldsymbol{J}^{WL}E(d\boldsymbol{L}) \\ &= \boldsymbol{J}^{WL}\boldsymbol{M}\underline{d\boldsymbol{L}} \end{aligned} \tag{6.24}$$

分散

$$\begin{aligned} V(dW_k) &= \underline{d\boldsymbol{L}}^T(\boldsymbol{J}_k^{WL}\boldsymbol{S})^T(\boldsymbol{J}_k^{WL}\boldsymbol{S})\underline{d\boldsymbol{L}} \\ &= \underline{d\boldsymbol{L}}^T(\boldsymbol{J}_k^{WL}\boldsymbol{S})^2\underline{d\boldsymbol{L}} \\ &(k = 1, \cdots, 6 \quad \text{for} \quad x_{Wx}, x_{Wy}, x_{Wz}, \theta_{Wx}, \theta_{Wy}, \theta_{Wz}) \end{aligned} \tag{6.25}$$

に従う確率変数となる. ここで,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M} &= \mathrm{diag}[\boldsymbol{M}_1, \cdots, \boldsymbol{M}_M] \\ \boldsymbol{M}_n &= \mathrm{diag}[m_{n1}, m_{n2}, m_{n3}] \end{aligned} \tag{6.26}$$

および

$$\begin{aligned} \boldsymbol{S} &= \mathrm{diag}[\boldsymbol{S}_1, \cdots, \boldsymbol{S}_M] \\ \boldsymbol{S}_n &= \mathrm{diag}[s_{n1}, s_{n2}, s_{n3}] \end{aligned} \tag{6.27}$$

は可変長部材の特性を表すパラメータを適応トラス全体についてまとめた行列であり,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{J}_k^{WL} &= \mathrm{diag}[\boldsymbol{J}_{k(1)}^{WL}, \cdots, \boldsymbol{J}_{k(M)}^{WL}] \\ \boldsymbol{J}_{k(n)}^{WL} &= \mathrm{diag}[j_{k(n1)}^{WL}, j_{k(n2)}^{WL}, j_{k(n3)}^{WL}] \end{aligned} \tag{6.28}$$

は増分形の機構関係を表すヤコビ行列$\boldsymbol{J}^{WL}$の要素$j_{k(ni)}^{WL}$ (作業空間ベクトルの要素kと部材niとの間の増分関係を表す係数) を対角要素とした行列である.

全体の大きさが同じでモジュール数の異なる二つの適応トラス, すなわち$M+1$のトラスモジュール (すなわち$3M$自由度) を持つタイプIと$rM+1$のトラスモジュール (すなわち$3rM$自由度) を持つタイプIIを考える. タイプIおよびタイプIIが作業空間において$\underline{d\boldsymbol{W}}$の運動を要請された時, 増分形の機構関係式 (2.42) を解いて得られる部材長変化の要請量をそれぞれ$\underline{d\boldsymbol{L}^{\mathrm{I}}}$および$\underline{d\boldsymbol{L}^{\mathrm{II}}}$とする. タイプIIに要請される部材長変化ベクトル$\underline{d\boldsymbol{L}^{\mathrm{II}}}$の個々の要素の大きさはタイプIの場合の$\underline{d\boldsymbol{L}^{\mathrm{I}}}$の$1/r$程度となり, 作業空間において達成される分散の大きさは式 (6.25) におけるベクトル$d\boldsymbol{L}$の要素数とその個々の要素の大きさを考えれば, タイプIIの場合にはタイプIに対し$(1/r)^2 \times r = 1/r$程度に抑制されることを期待することができる.

6.3.2 巨視的な観点に基づく適応トラスの動作

(1) 作業空間における分散を抑制するための動作評価規範

動作評価規範gを用いて記述した適応トラスの増分形の動作制御を表す最小化問題

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad g(\underline{d\boldsymbol{L}}) \quad \text{with respect to} \quad \underline{d\boldsymbol{L}} \\ &\text{subject to} \quad \underline{d\boldsymbol{W}} = E(d\boldsymbol{W}) = \boldsymbol{J}^{WL}\boldsymbol{M}\underline{d\boldsymbol{L}} \end{aligned} \tag{6.29}$$

において, 作業空間におけるばらつき (分散) の抑制という観点に立った二つの評価規範を導入する. すなわち, 各増分ステップにおいて達成される作業空間ベクトルの各要素の分散の和

$$\begin{aligned} g^A &= \sum_k V(dW_k) = \sum_{k=1}^{6} \underline{d\boldsymbol{L}}^T (\boldsymbol{J}_k^{WL}\boldsymbol{S})^2 \underline{d\boldsymbol{L}} \\ &= \underline{d\boldsymbol{L}}^T \left[\sum_{k=1}^{6} (\boldsymbol{J}_k^{WL}\boldsymbol{S})^2 \right] \underline{d\boldsymbol{L}} \end{aligned} \tag{6.30}$$

および各増分ステップにおいて要請する部材長変化の大きさの二乗和

$$g^B = \underline{d\boldsymbol{L}}^T \underline{d\boldsymbol{L}} \tag{6.31}$$

を考える. 評価規範g^Aは直接的に作業空間ベクトルにおける分散を最小化しようとするものであり, 評価規範g^Bは必要となる機構運動のための部材長変化を全ての部材に割り当てることにより, 前節の最後で述べた効果を意図したものである.

(2) 巨視的なパラメータの導入

ここで考えているような状況の下で, 多数の可変長部材の特性を表すパラメータの全てを詳細に考慮することは処理を複雑なものとし, またこ

れらのパラメータの経時変化などの可能性を考えればあまり現実的な手法とは言えない. そこで, 適応トラスの保有する可変長部材の数が統計的な取り扱いを行うのに十分であることにかんがみ, 巨視的な視点に基づくパラメータを導入する. すなわち, 式 (6.21) および式 (6.22), (6.23) を

$$E(dl_{ni}) = \underline{m}\underline{dl_{ni}} \tag{6.32}$$

および

$$S(dl_{ni}) = \underline{s}\underline{dl_{ni}} \tag{6.33}$$

$$V(dl_{ni}) = \underline{s}^2\underline{dl_{ni}}^2 \tag{6.34}$$

と書き改める. ここで, $\underline{m}$および$\underline{s}$は, 可変長部材の個々の特性を表すパラメータの統計量に基づく巨視的なパラメータであり,

$$\underline{m} = E(m_{ni}) \tag{6.35}$$

および

$$\underline{s}^2 = V(m_{ni}) + E(s_{ni})^2 \tag{6.36}$$

と表される[2]. これらのパラメータを用いれば, 式 (6.24) および (6.25) は

$$E(d\boldsymbol{W}) = \underline{m}(\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}}) \tag{6.37}$$

$$V(dW_k) = \underline{s}^2\underline{d\boldsymbol{L}}(\boldsymbol{J}_k^{WL})^2\underline{d\boldsymbol{L}} \tag{6.38}$$

と書き改めることができ, 評価規範 g^Aは

$$\begin{aligned} g^A &= \sum_k V(dW_k) = \sum_k \underline{s}^2\underline{d\boldsymbol{L}}^T(\boldsymbol{J}_k^{WL})^2\underline{d\boldsymbol{L}} \\ &= \underline{s}^2\underline{d\boldsymbol{L}}^T\left[\sum_k(\boldsymbol{J}_k^{WL})^2\right]\underline{d\boldsymbol{L}} \end{aligned} \tag{6.39}$$

となる. この場合にはパラメータ$\underline{s}$は動作評価規範全体に対する係数となるため, 動作評価に必要なパラメータは$\underline{m}$のみとなる.

[2] ここでは, s_{ni}の分散 $V(s_{ni})$ の影響については考慮していない.

(3) パラメータの推定

パラメータ$\underline{m}$が未知である場合, あるいはその経時変化を考慮する場合には, 適応トラスの作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$における位置を観測するセンサを準備することにより, 動作制御に用いるパラメータ$\underline{m}$を推定することができる. 式 (6.37) より, 次の関係が得られる.

$$E(d\boldsymbol{W})^T E(d\boldsymbol{W}) = \underline{m}^2(\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}})^T(\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}}) \tag{6.40}$$

これより, パラメータ$\underline{m}$が

$$\underline{m} = \left(\frac{E(d\boldsymbol{W})^T E(d\boldsymbol{W})}{(\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}})^T(\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}})}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{6.41}$$

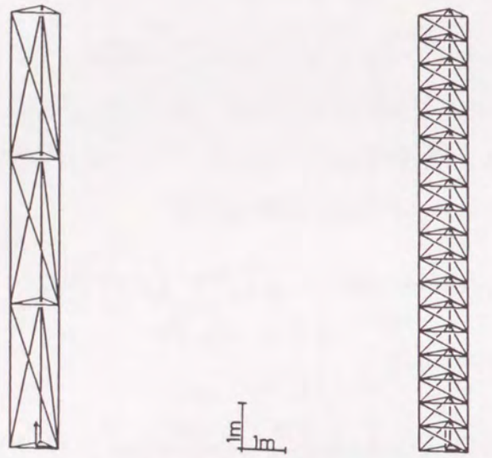
として計算できる. ここでは, パラメータの経時変化などを考慮し, 次のような手法でパラメータ$\underline{m}$を逐次的に修正してゆく手法を採用する.

$$\underline{m} \leftarrow \underline{m} + \gamma\left[\frac{(d\boldsymbol{W}^T d\boldsymbol{W})^{(1/2)}}{\underline{m}((\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}})^T(\boldsymbol{J}^{WL}\underline{d\boldsymbol{L}}))^{(1/2)}} - 1\right] \tag{6.42}$$

ここで, γは微小定数であり, 各増分ステップ $d\boldsymbol{L}$を与えたことにより生じた作業空間ベクトルの増分をセンサによって観測した量を式 (6.42) における $d\boldsymbol{W}$として用いる.

6.3.3 シミュレーションによる検証

提案した手法の有効性を検証するため, 計算機シミュレーションを行った. 9 モジュール 24 自由度と, 54 モジュール 159 自由度の二種類の適応トラスを用い, 図 6.5に示す初期姿勢 ($\boldsymbol{W}^0$ =[0, 0, 9(m), 0, 0, 0(deg)]^T) から, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$ =[−3, 0, 7(m), 0, −30, 0(deg)]^{T}を 20 増分ステップで達成するタスクを与えた場合について検討を行った. センサとしては, 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$を観測するものを想定した.



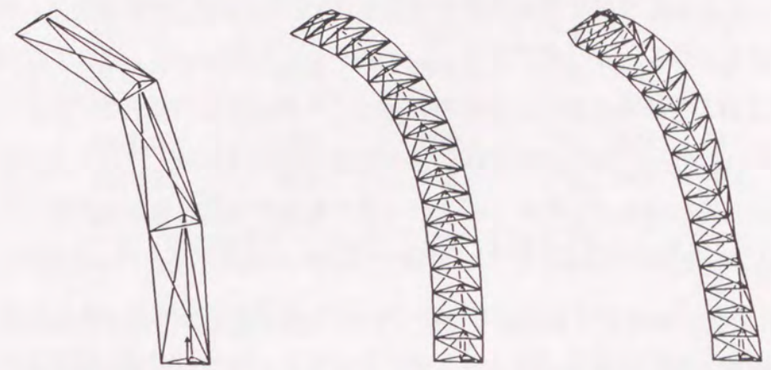
(a) 9 モジュール, 24 自由度　　(b) 54 モジュール, 159 自由度

図 6.5: シミュレーションに用いた適応トラスの初期姿勢

(1)　自由度数および評価規範についての検討

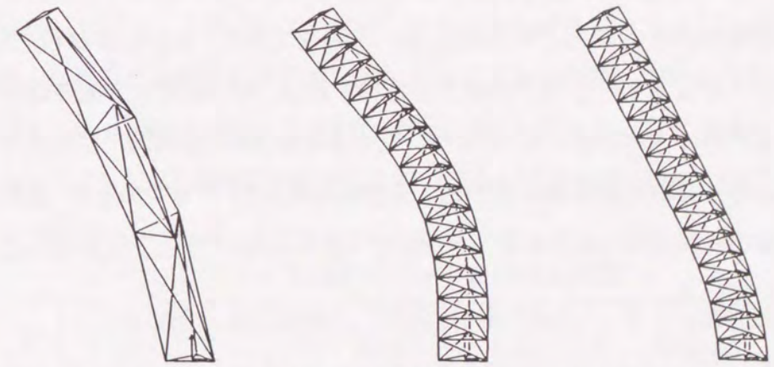
提案した動作制御手法による作業空間の誤差を 6 種類のシミュレーションを通じて調べた結果を図 6.6および表 6.1に示す. シミュレーション I^A, I^Bは 9 モジュール 24 自由度の適応トラス, シミュレーション II^A, II^Bは 54 モジュール 159 自由度の適応トラスについて行ったものである. また, シミュレーション III^A, III^Bは 54 モジュール, 159 自由度の適応トラスを用いた場合の, 目標作業空間ベクトル$\underline{\boldsymbol{W}}$と初期姿勢における作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}^0$の間を 4 往復した後に再び到達した目標作業空間での誤差について調べたものである. それぞれの上添字 A および Bは適用した評価規範 g^Aおよび g^Bを表す. なお, 部材の特性を表すパラメータはすべての部材について $m_{ni} = 1.0$, $s_{ni} = 0.2$ とした.

シミュレーション I^Aと II^Aの結果の比較および I^Bと II^Bの比較により,



(I^A) 9 モジュール　　(II^A) 54 モジュール　　(III^A) 54 モジュール (4 往復後)

評価規範 g^Aに基づく動作結果



(I^B) 9 モジュール　　(II^B) 54 モジュール　　(III^B) 54 モジュール (4 往復後)

評価規範 g^Bに基づく動作結果

図 6.6: 提案した動作制御手法により得られた最終姿勢
($m_{ni} = 1.0$, $s_{ni} = 0.2$, パラメータは既知)

表 6.1: シミュレーションの結果得られた誤差

	自由度数	評価規範	誤差 (作業空間)* 位置 (m)	方向 (deg)	誤差 (部材長) (平均値)(m)
I^A	24	g^A	0.038	6.44	0.0178
I^B	24	g^B	0.056	6.99	0.0110
II^A	159	g^A	0.006	0.40	0.0024
II^B	159	g^B	0.008	0.41	0.0019
III^A	159	g^A	0.044	2.33	0.0101
III^B	159	g^B	0.007	0.79	0.0052

* $\|\boldsymbol{X}_W - \underline{\boldsymbol{X}_W}\|$ および $\|\boldsymbol{\Theta}_W - \underline{\boldsymbol{\Theta}_W}\|$ により評価した.

159 自由度の適応トラスにより達成された目標作業空間における誤差は 24 自由度の適応トラスの場合に比較して位置誤差で 1/6 程度, 方向誤差で 1/16 程度とかなり小さく, 6.3.1節で述べた考え方が有効であることが示されている. また, シミュレーション I^A と I^B の結果の比較, および II^A と II^B の結果の比較より, 評価規範 g^A を用いた I^A および II^A のほうが g^B を用いた I^B および II^B より誤差が小さいことがわかる. このことは特に自由度数の小さい I^A と I^B の比較において顕著である. しかしながら, シミュレーション III^A と III^B の結果を比較すれば, その誤差の大きさは明確に III^B のほうが小さくなっている. これらの結果は, 短期的には作業空間における分散を直接的に最小化する評価規範 g^A が有効であるが, 長期的には可変長部材の誤差の累積を抑制する評価規範 g^B が有効であることを示している.

(2) 巨視的パラメータの推定

次に, 巨視的パラメータ $\underline{m}$ の推定について検討を行うため, 54 モジュール, 159 自由度の適応トラスを用いて 4 種類のシミュレーションを行った. シミュレーション IV^N および IV^E は可変長部材の特性を表すパラメータ

m_{ni} が平均 0.7, 標準偏差 0.2 の一様分布に従う場合であり, シミュレーション V^N および V^E は可変長部材のバイアス特性を表すパラメータ m_{ni} は 1.0 であるが, 30%(48 本) の可変長部材が初期姿勢に示す状態から故障して作動しない状況を想定している. 初期姿勢における作業空間ベクトル $\boldsymbol{W}^0$ と目標作業空間ベクトル $\underline{\boldsymbol{W}}$ との間を 4 往復させた後に再度 $\underline{\boldsymbol{W}}$ を達成した状態でのそれぞれの姿勢を図 6.7に, 推定されたパラメータおよび作業空間における誤差の値を表 6.2に示す. それぞれにおいて上添字 N は巨視的パラメータ $\underline{m}$ として 1.0 を仮定した動作を行わせた場合, E はパラメータ $\underline{m}$ を推定つつ動作を行わせた場合を示している. 式 (6.42) における係数 γ は 0.1 とした. なお, パラメータ s_{ni} はいずれの場合もすべての部材について 0.2 とし, 動作評価規範としては個々の部材の誤差の累積を抑制する g^B を用いた.

シミュレーション IV^N と IV^E の結果を比較すれば, IV^E の場合の誤差は IV^N の場合の 1/2 程度となっており, 推定したパラメータ $\underline{m}$ の値 0.856 は適用した値 0.7 と異なっているが, 推定を行わず $\underline{m} = 1.0$ として動作を行った場合に比較すれば作業空間における誤差は明確に抑制されており, パラメータの推定を行うことの有効性が示されている. また, シミュレーション V^N と V^E の結果を比較した場合でも, V^E の場合の誤差は V^N の場

表 6.2: 巨視的パラメータの推定結果

	適用値 $E(m_{ni})$	推定結果 $\underline{m}$	誤差 (作業空間)* 位置 (m)	方向 (deg)	誤差 (部材長) (平均値)(m)
IV^N	0.7	(1.000)	0.067	0.66	0.0163
IV^E	0.7	0.856	0.027	0.31	0.0151
V^N	1.0	(1.000)	0.107	1.02	0.0205
V^E	1.0	0.701	0.036	0.46	0.0220

* 表 6.1と同様.

(IV^N) 推定なし ($\underline{m} = 1.0$ と仮定)

(IV^E) 推定を行いながら動作
(推定結果$\underline{m} = 0.856$)

パラメータ m_{ni}の平均 $E(m_{ni})$ が 0.7 の場合

(V^N) 推定なし ($\underline{m} = 1.0$ と仮定)

(V^E) 推定を行いながら動作
(推定結果$\underline{m} = 0.701$)

可変長部材の 30%が故障している場合 ('//' は故障した部材を示す)

図 6.7: 巨視的パラメータの推定に基づく動作の結果

合の 1/2 程度となっており, 可変長部材に故障が生じた場合においても適応トラス全体としての動作を提案した手法により行うことができる可能性が示されている.

6.4 機構的に形態が定まらない実モデルのポテンシャル場における安定化形態

2.1節で述べたように, 適応トラスは概念的には節点が大きさを持たないとして取り扱うことができる (概念モデル). しかしながら, 部材長さの調節により形態を可変とするためには, 節点部において複数の可変長部材を接続する複数のジョイントが必要となり, このような点を考慮した機構モデル (実モデル) を構築することが必要となる. 2章および 3章では機構的な形態の一意性, すなわち部材長を固定した時の構造としての静定性確保という観点から, 部材を接続するジョイントを持つ節点ブロックを縦部材と一体化した実モデルに基づいて議論を行った. しかしながら, 節点ブロックがいずれの部材とも独立した構成の実モデルを考えることもできる. このような構成の実モデルは, 受動的な自由度が過剰となり機構的には形態が一意に定まらない構成を持つことになるが, 適当なポテンシャル場の下では安定な形態をとることができる. ここでは, このような場合の安定化形態解析について考察を行う.

6.4.1 安定化形態の解析手法

(1) 幾何学的関係式の定式化

形態解析において用いる適応トラスの実モデルのトラスモジュールを図 6.8に示す. これは, 2.3節で導入した図 2.3に示したトラスモジュールに, ジョイント $[n, 3]$ とは別に新たにジョイント $[n, -3]$ を導入し, 節点ブ

ロック n と縦部材 $n1$ とを分離したものである. また, すべてのジョイントは3自由度の球面ジョイントを仮定している. ここでは, このような構成のトラスモジュールを組み合わせて構成される適応トラスを取り扱う.

半谷ら[30]の提案する形態解析手法を適用するため, 図6.8に示すトラスモジュールにより構成される適応トラスの幾何学的関係式の定式化を行う. 2.3.2節と同様に, トラスモジュールにおける幾何学的関係式

$$\boldsymbol{L}_n = \begin{bmatrix} l_{n1} \\ l_{n2} \\ l_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(\boldsymbol{X}_{n,-3} - \boldsymbol{X}_{n-3,3})^T (\boldsymbol{X}_{n,-3} - \boldsymbol{X}_{n-3,3})]^{(1/2)} \\ [(\boldsymbol{X}_{n,-2} - \boldsymbol{X}_{n-2,2})^T (\boldsymbol{X}_{n,-2} - \boldsymbol{X}_{n-2,2})]^{(1/2)} \\ [(\boldsymbol{X}_{n,-1} - \boldsymbol{X}_{n-1,1})^T (\boldsymbol{X}_{n,-1} - \boldsymbol{X}_{n-1,1})]^{(1/2)} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

が定式化の出発点となる. ただし, 2.3.2節の場合とは異なり, $\boldsymbol{X}_{n,-3} \neq \boldsymbol{X}_n$ であることに注意しなければならない. 式 (2.12) にジョイントの位置を記述する式

$$\boldsymbol{X}_{n,a} = \boldsymbol{Q}_n \boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)} + \boldsymbol{X}_n \tag{2.13}$$

を代入し, 式 (2.11)

$$\boldsymbol{Q}_n = \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{\Theta}_n) \tag{2.11}$$

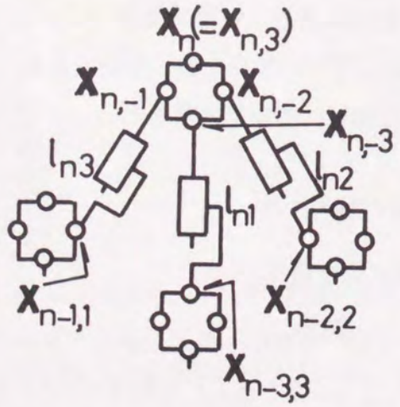


図 6.8: 形態解析において用いる実モデルのトラスモジュール

を考慮してまとめれば, 次の形式に整理することができる.

$$\boldsymbol{L}_n = \boldsymbol{L}_n^{X\Theta}(\boldsymbol{X}_n, \boldsymbol{\Theta}_n;\ \boldsymbol{X}_{n-4+i}, \boldsymbol{\Theta}_{n-4+i}\ i = 1,2,3) \tag{6.43}$$

(2) 増分形表現と形態解析

式 (6.43) のパラメータ t による微分[3]

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{L}}_n &= \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{X\Theta}}{\partial \boldsymbol{X}_n}\dot{\boldsymbol{X}}_n + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{X\Theta}}{\partial \boldsymbol{\Theta}_n}\dot{\boldsymbol{\Theta}}_n \\ &\quad + \sum_{i=1}^{3}\left[\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{X\Theta}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-4+i}}\dot{\boldsymbol{X}}_{n-4+i} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{X\Theta}}{\partial \boldsymbol{\Theta}_{n-4+i}}\dot{\boldsymbol{\Theta}}_{n-4+i}\right] \end{aligned} \tag{6.44}$$

を適応トラス全体についてまとめれば

$$\dot{\boldsymbol{L}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \boldsymbol{X}^*}\dot{\boldsymbol{X}}^* \tag{6.45}$$

$$= \boldsymbol{A}\dot{\boldsymbol{X}}^* \tag{6.46}$$

なる増分関係が得られ, 形態解析の基礎式となる. 2章で述べた実モデルの場合にはこの関係に機構的な一意性を保つための制約条件を加えることにより, 機構関係式を導いた. ここで, $\boldsymbol{X}^* = [\boldsymbol{X}_1^{*T}, \cdots, \boldsymbol{X}_M^{*T}]^T$, $\boldsymbol{X}_n^* = [\boldsymbol{X}_n^T, \boldsymbol{\Theta}_n^T]^T$ は3.3.1節で導入したものと同じ節点位置に節点部姿勢角を伴わせて拡張した全節点位置ベクトルである. 式 (6.46) における $\boldsymbol{A}$ は $3M \times 6M$ 行列である.

部材長が規定された時のポテンシャル場における形態解析[30]を考え, 解析の過程で部材長さは変化しないとする. すなわち

$$\dot{\boldsymbol{L}} = 0 \tag{6.47}$$

である. したがって, 式 (6.46) は

$$\boldsymbol{A}\dot{\boldsymbol{X}}^* = 0 \tag{6.48}$$

[3] $\dot{(\ )}$ でパラメータ t による微分を表す.

となる. 式 (6.48) の一般解は, $\dot{\boldsymbol{\alpha}}$を任意のベクトルとして, 次式により与えられる.

$$\dot{\boldsymbol{X}}^* = [\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}^+\boldsymbol{A}]\dot{\boldsymbol{\alpha}} \tag{6.49}$$

ここで, 肩添字 $(^+)$ はムーア·ペンローズ一般逆行列を表す. 係数マトリクス$\boldsymbol{A}$のランクをrとすれば,

$$\mathrm{rank}([\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}^+\boldsymbol{A}]) = 6M - r = p \tag{6.50}$$

であるから, 式 (6.49) は, $[\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}^+\boldsymbol{A}]$ の一次独立な列ベクトル$\boldsymbol{h}_1, \cdots, \boldsymbol{h}_p$を用いて次のように表される.

$$\dot{\boldsymbol{X}}^* = \dot{\alpha}_1\boldsymbol{h}_1 + \dot{\alpha}_2\boldsymbol{h}_2 + \cdots + \dot{\alpha}_p\boldsymbol{h}_p \tag{6.51}$$

節点位置変化$\Delta\boldsymbol{X}$は, パラメータの増分Δt を用いて

$$\Delta\boldsymbol{X} = \dot{\boldsymbol{X}}^*\Delta t \tag{6.52}$$

となり, $\dot{\boldsymbol{\alpha}} = [\dot{\alpha}_1, \cdots, \dot{\alpha}_p]^T$ により定まる.

節点位置の変化によるポテンシャルエネルギΠの変化は, 節点に作用するポテンシャル力ベクトル$\boldsymbol{F}^*$(式 (3.117) 参照) を用いて次のように表される.

$$\Delta\Pi = -(\dot{\boldsymbol{X}}^*)^T\boldsymbol{F}^*\Delta t \tag{6.53}$$

式 (6.53) が常に負になるような$\dot{\boldsymbol{X}}^*$を用いて節点位置を変化させてゆき, 停留点を探索すれば, ポテンシャルエネルギを最小 (極小) とする, すなわち安定化形態を求めることができる. 式 (6.53) に式 (6.51) を代入すれば, 次式が得られる.

$$\Delta\Pi = -(\dot{\alpha}_1\boldsymbol{h}_1^T\boldsymbol{F}^*\Delta t + \dot{\alpha}_2\boldsymbol{h}_2^T\boldsymbol{F}^*\Delta t + \cdots + \dot{\alpha}_p\boldsymbol{h}_p^T\boldsymbol{F}^*\Delta t) \tag{6.54}$$

したがって,

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \dot{\alpha}\begin{bmatrix} \boldsymbol{h}_1^T\boldsymbol{F}^* \\ \vdots \\ \boldsymbol{h}_p^T\boldsymbol{F}^* \end{bmatrix} \tag{6.55}$$

とすれば,

$$\Delta\Pi = -\dot{\alpha}\sum_{i=1}^{p}(\boldsymbol{h}_i^T\boldsymbol{F}^*)^2\Delta t \le 0 \tag{6.56}$$

が成り立つ. このようにして微小定数$\dot{\alpha}$からベクトル$\dot{\boldsymbol{\alpha}}$を定め, 式 (6.51) および (6.52) により$\Delta\boldsymbol{X}^*$を求めて

$$\boldsymbol{X}^*(t + \Delta t) = \boldsymbol{X}^*(t) + \Delta\boldsymbol{X}^* \tag{6.57}$$

として節点位置を変化させてゆくことにより, ポテンシャル場における安定化形態が得られる. ただし, 停留条件は$\Delta\boldsymbol{X}^* = \boldsymbol{O}$である.

(3) 線形化誤差の補正

前節で述べた形態解析手順は, 式 (6.46) に見られるように, 一次項までの増分関係に基づいているため, 式 (6.57) の繰り返しにより, 本来固定であるべき部材長さに伸縮が生じる. このような線形化による誤差を回避する方法として, 半谷らは文献[30]において, 高次項を導入した解析手法を提案しているが, 行列$\boldsymbol{A}(= \partial\boldsymbol{L}/\partial\boldsymbol{X}^*)$ の微分が必要となるため基礎式の定式化が複雑になり, また, 計算量も増大する. そこで, ここでは, より直接的な手法として, 各増分ステップにおける線形化誤差を補正する手順について述べる.

初期形態における部材長さベクトルを$\boldsymbol{L}^0$で表せば, 部材長さの誤差$\boldsymbol{L}^{\mathrm{err}}$は,

$$\boldsymbol{L}^{\mathrm{err}} = \boldsymbol{L} - \boldsymbol{L}^0 \tag{6.58}$$

で表される. $\boldsymbol{L}^{\mathrm{err}}$は, 線形化誤差による微小量であるから, 式 (6.46) の増分関係を用いて,

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{X}^*)^{\mathrm{err}} = \boldsymbol{L}^{\mathrm{err}} \tag{6.59}$$

を満たす $(\boldsymbol{X}^*)^{\mathrm{err}}$を

$$(\boldsymbol{X}^*)^{\mathrm{err}} = \boldsymbol{A}^{-}\boldsymbol{L}^{\mathrm{err}} \tag{6.60}$$

として求め,

$$\boldsymbol{X}^* \leftarrow \boldsymbol{X}^* - (\boldsymbol{X}^*)^{\mathrm{err}} \tag{6.61}$$

として節点位置を補正する. ここで, $\boldsymbol{A}^{-}$は反射型の一般化逆行列を表す. 部材長さの誤差についての補正量を全ての節点位置に均等に割り当てるため, ここでは, $\boldsymbol{A}^{-}$として疑似逆行列[105]を用いる.

(4) 形態解析手順

以上に述べた理論に基づく形態解析手順をまとめると, 以下のようになる.

1. 基礎式 (6.46) を構成する係数マトリクス$\boldsymbol{A}$を求める.
2. 係数マトリクス$\boldsymbol{A}$のムーア·ペンローズ一般逆行列$\boldsymbol{A}^{+}$を求める.
3. 式 (6.49) における $[\boldsymbol{I}_n - \boldsymbol{A}^{+}\boldsymbol{A}]$ の一次独立なベクトル$\boldsymbol{h}_1, \cdots, \boldsymbol{h}_p$を求め, 式 (6.55) より$\dot{\boldsymbol{\alpha}}$を計算する.
4. 式 (6.51) より$\dot{\boldsymbol{X}}^*$を求め, これに基づいて式 (6.57) にしたがって節点位置を変化させる.
5. 節点位置変化$\Delta\boldsymbol{X}^* = 0$であれば, 解析を終了する.

6. 幾何学的関係式 (6.43) から部材長さ$\boldsymbol{L}$を求め, 前節で述べた手順により節点位置の補正を行う.
7. 変化した後の形態に対して手順1より繰り返す.

(5) ジョイントの回転角範囲の考慮

節点部において部材を接続するジョイントの回転角には限度があるため, 形態解析のためには, これらのジョイントの回転角範囲を考慮する必要がある. ここでは, 6.2.2節と同様の回転角 (図 6.1) を用いることとする. ジョイント回転角範囲に基づく制約条件は, 回転角範囲の余弦$\lambda_{n,a\mathrm{Min}}$および$\lambda_{n,a\mathrm{Max}}$ を用いて

$$\begin{aligned} \lambda_{n,a} &= \cos\gamma_{n,a} \\ \lambda_{n,a\mathrm{Min}} &\le \lambda_{n,a} \le \lambda_{n,a\mathrm{Max}} \end{aligned} \tag{6.62}$$

と表される. ジョイント回転角の余弦$\lambda_{n,a}$は, 式 (6.16) を $a = -3$ に対しても拡張した

$$\lambda_{n,a} = \begin{cases} \boldsymbol{e}_{n,a}^{T}(-\boldsymbol{e}_{n(4+a)}) & (a = -3, -2, -1) \\ \boldsymbol{e}_{n,a}^{T}\boldsymbol{e}_{(n+a)(4-a)} & (a = 1, 2, 3) \end{cases} \tag{6.63}$$

により与えられる. 式 (2.13) を考慮し, 式 (6.16)-(6.18) を参照すれば式 (6.63) は次のような形式に整理することができる.

$$\lambda_{n,a} = \lambda_{n,a}^{X\Theta}(\boldsymbol{X}_n, \boldsymbol{\Theta}_n, \boldsymbol{X}_{n+a}, \boldsymbol{\Theta}_{n+a}) \tag{6.64}$$

これより, 式 (6.64) のパラメータ t による微分が, 次式のように得られる.

$$\dot{\lambda}_{n,a} = \frac{\partial\lambda_{n,a}^{X\Theta}}{\partial\boldsymbol{X}_n}\dot{\boldsymbol{X}}_n + \frac{\partial\lambda_{n,a}^{X\Theta}}{\partial\boldsymbol{\Theta}_n}\dot{\boldsymbol{\Theta}}_n + \frac{\partial\lambda_{n,a}^{X\Theta}}{\partial\boldsymbol{X}_{n+a}}\dot{\boldsymbol{X}}_{n+a} + \frac{\partial\lambda_{n,a}^{X\Theta}}{\partial\boldsymbol{\Theta}_{n+a}}\dot{\boldsymbol{\Theta}}_{n+a} \tag{6.65}$$

ここで, $(\partial\lambda_{n,a}^{X\Theta}/\partial\boldsymbol{X}_n)$ 等の導出の詳細については付録 A.6.2に示す. ジョイント回転角範囲を考慮した形態解析を行うには, 範囲を越えるジョイ

ントの回転角を固定すればよい. すなわち, 形態解析解析手順の手順 4の部分を次のように修正する.

手順 4.

4:1 式 (6.51) より$\dot{\boldsymbol{X}}^*$を求め, これに基づいて式 (6.57) にしたがって節点部の位置および姿勢を変化させる.

4:2 新たな節点位置に基づく形態についてジョイント回転角を計算し, 回転角範囲の制約を調べる. 全てのジョイント回転角が回転角範囲内であれば, 手順 4を終了する.

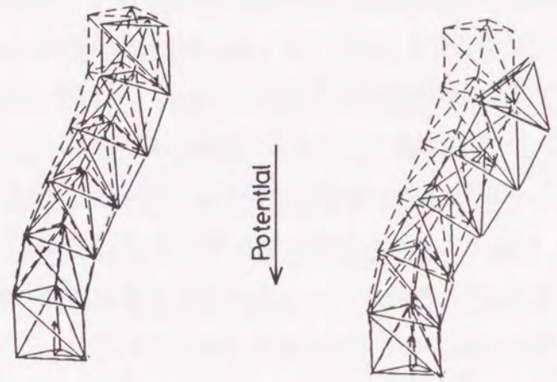
4:3 回転角範囲を越えたジョイントの回転角を固定するための制約を加えて再計算を行う. すなわち, 行列$\boldsymbol{A}$に式 (6.65) に対応する行を加え, 再び手順 2より解析を行う.

6.4.2 形態解析シミュレーション

以上に述べた理論に基づいて適応トラスの形態解析シミュレーションを行った結果を図 6.9に示す. ポテンシャル場による外力の方向は図 6.9(a) および (b) は鉛直下向き, 図 6.9(c) および (d) は水平左向きとし, 部材長さの約 2%(表 2.1 [4] の 1/5) および約 6%(表 2.1の 3/5) の大きさの節点オフセットを持つ適応トラスについて破線に示した初期形態からの安定化形態の解析を行った. なお, ジョイントの回転角範囲は直立姿勢の場合を基準として, 中立軸から 60(deg) としている.

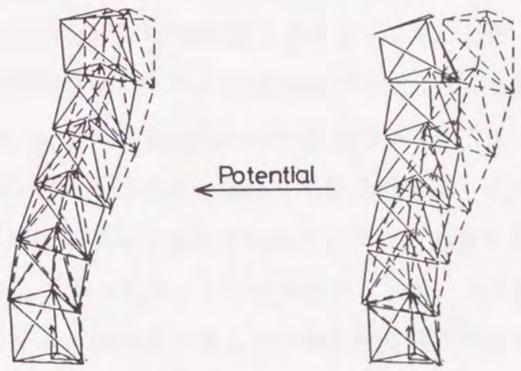
得られた結果を初期形態と比較すれば, 安定化形態における節点オフセットの影響が非常に大きいことが理解できる. また, ポテンシャル力の方向による安定化形態の違いに注目すれば, 水平方向のポテンシャル力の

[4] 表 2.1に記載されていない, $a = -3$ については$\boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)} = [0,\ 0,\ -200]^T$(mm) とした.



(a) 2%オフセット　　(b) 6%オフセット

鉛直下向きのポテンシャル場



(c) 2%オフセット　　(d) 6%オフセット

水平左向きのポテンシャル場

図 6.9: 形態解析例 (ジョイント回転角範囲 60(deg))

場合のほうが, 鉛直方向のポテンシャル力の場合に比して初期形態からの節点変位が大きくなっていることがわかる. このことは, 節点オフセットを持つ適応トラスの初期形態の設計の際にはポテンシャル力の方向を考慮する必要があることを示している. また, 図 6.9(a) と (b) とを比較すれば, その安定化形態の様子が異なっていることがわかる. これは, 節点オフセットが 2%の場合には本来の四面体の構造を保っていた最上部のトラスモジュールが, 6%の場合には保てなくなったことを示している. この結果は, 節点オフセットを設計する際には, トラスモジュールの機構変形の程度を考慮し, 節点オフセットの大きさを四面体の構造を保つことのできる程度に抑えることの重要性を示している.

6.5 おわりに

本章では, 適応トラスが持つ特徴に注目し, システムとしての実現に関連して検討を行った.

6.2節では, 機械システムとしての基本的な特性のひとつである, 作業空間における可到達性について検討を行った. 2.3節で提案した適応トラスの実モデルに基づき, 可変長部材の伸縮範囲と節点部において部材を接続するジョイントの回転角範囲を制約とした問題の定式化を行い, 増分形の記述により逐次的に可到達範囲を探索する手法を提案した. シミュレーションを行い, 適応トラスは並列リンクメカニズムであるにもかかわらずかなりの可到達範囲を持つことが示された.

6.3節では, 適応トラスの機構的自由度が多数である点に着目した動作手法について検討した. 機械システムの動作の正確さは作業空間において評価されるべきものであることに注目し, 可変長部材の動作がばらつきを持つ場合でも, 全体としては目標作業空間を達成できる可能性があ

ることを示した. また, 個々の可変長部材の特性に拘泥することなく巨視的なパラメータを用いて全体の動作を行うことを提案した. シミュレーションを行い, 提案した考え方が有効であり, 可変長部材の経時変化や故障に対しても適用できる可能性があることを示した.

6.4節では, 2.3節で提案した場合とは異なり, 機構的には形態が一意に定まらない構成をもつ適応トラスの実モデルについてポテンシャル場における安定化形態の解析を行った. 形態解析シミュレーションを行い, 適応トラスの安定化形態はポテンシャル場の向きおよびオフセットの大きさによる影響が大きいことを示した.

第7章

結論

自然界の生き物は, その最大の特徴としてやわらかさ, 柔軟性を持ち, 環境に適応して生きてゆく非凡な能力を持っている. 本論文では, 生き物のこのようなやわらかさはその様々な側面における高い冗長性にあるとの視点から, 高多自由度性を特徴とする適応トラスの機構と動作について研究を行った.

適応トラスは静定トラスのトポロジを持ち, 部材長さを調節することによりその形態および力学的特性を目的に応じて変化させる機械システムである. 2章では, このような適応トラスの機構学について述べた. 適応トラスは, 概念的には節点部の大きさを考慮しない理想的なトラス構造を持つモデル (概念モデル) により取り扱うことができるが, その実現のためには節点部において部材を接続するジョイント間のオフセットについて考慮したモデル (実モデル) が必要となる. 概念モデルと同様に部材長さによりその形態が一意に定まる実モデルの構成を示し, その機構関係式の定式化を行った. 機構運動シミュレーションを通じて, 提案した実モデルが機構的に概念モデルと同等の機能を持つことを確認し, その動作における節点オフセットの影響について検討した.

機械システムにおいて, その動力学的ふるまいは基本的な特性のひとつである. 3章では, 2章で導入した適応トラスの概念モデルおよび実モデ

ルの動力学的特性について述べた. ひずみエネルギ, 運動エネルギ, ポテンシャルエネルギの各エネルギの定式化を行い, Lagrange の運動方程式を導いた. 実モデルの場合の定式化においては, 概念モデルの場合に用いた運動を記述する変数を拡張することにより, 概念モデルとの統一的な取り扱いを示した. 得られた運動方程式を用いて動力学モデルによるシミュレーションスタディを行った. その結果, 実モデルにおいては曲げおよびねじりのモーメントを受ける縦部材の曲げ剛性およびねじり剛性が適応トラスの動力学的特性を大きく支配することが示された. また, 節点オフセットの大きさの影響についても固有振動数を通じて検討し, 節点オフセットの大きさをある値以下に抑えることにより, 実モデルにおいても概念モデルと同等の動力学的特性を確保できることが例示された.

適応トラスがその保有する多くの機構的自由度を用いた柔軟な動作を行うためには, どのような動作を行えばよいか, という動作誘導の考え方が重要となる. このような動作誘導を考えるために, 4章では階層型ニューラルネットワークの学習機能とそのための基本的な手法である誤差逆伝播法に注目した動作誘導手法を提案した. 適応トラスの機構学関係に対応するネットワークと動作を評価する規範に対応するネットワークとを組み合わせることにより, 規範に基づいた動作誘導が可能となる. これらのニューラルネットワークは適応トラスの機構的自由度の大きさから必然的に大規模なものとならざるを得ないが, このような大規模なニューラルネットワークに対して全体として学習処理を行うことは困難である. 比較的小規模なネットワークのモジュール (ネットワークモジュール) を個別に準備し, 学習処理を行い, それらを組み合わせて全体を構成するモジュール化構成の考え方を示した. このようなモジュール化構成は, 動作誘導システムの柔軟性という側面にも寄与している. 提案した手法に基

づく動作誘導シミュレーションは, 動作誘導のための評価規範と適応トラスの動作の密接な関連を示すとともに, 提案した手法の有効性を例証するものであった.

適応トラスがどのような動作を行えばよいか, という問題は, 動作誘導において用いられる評価規範をどのように決定するか, という問題に帰着することができる. 5章では, 4章で提案した動作誘導手法において用いた階層型のニューラルネットワークの持つ学習機能に着目し, このような動作評価規範を試行動作を通じて経験的・帰納的に獲得する手法について述べた. この場合に 4章で導入したネットワークのモジュール化構成を適用することにより, 動作評価規範を表すネットワークを評価規範の基本要素に対応するネットワークモジュールから構成する考え方を示した. これらのネットワークモジュールは, 適応トラスの機構学的構成に着目したより小規模のネットワークモジュールを用いて構成することもできる. このようなネットワークのモジュール化構成により, 規範獲得の際の学習処理の軽減や, 適応トラスの規模に応じた柔軟なネットワークの構成が可能となる. また, 動作誘導システムをニューラルネットワークを用いて構成することにより, 動作目的, 環境, 条件, 評価規範の変化に対する適応動作のための処理を統一的に取り扱うことができることを示した. 提案した動作評価規範の獲得をシミュレーションにより行い, その基本的な可能性を示すことができた.

適応トラスの持ついくつかの特徴に関連して, システムとしての実現を考慮する際に必要な事柄についての検討を 6章で行った. 適応トラスをロボットアームあるいは宇宙用クレーンとして用いる場合には, その作業空間における可到達性が基本的な性能指標のひとつとなる. この探索アルゴリズムを提案し, 可到達限の探索シミュレーションを行った. これに

より, 適応トラスは機構的には並列メカニズムであるが, かなり大きな可到達範囲を持つことができることが示された. また, 機構的自由度が非常に大きいことに着目した, 可変長部材の特性のばらつきあるいは不具合を統計的に取り扱うことによる動作制御についても議論を行い, 個々の可変長部材が精度を持たない場合でも, 作業空間においては目標を達成しうる可能性を示した. さらに, 2章で導入したものとは異なる, 形態が機構的には一意に定まらない構成をも許容した場合の適応トラスの実モデルのポテンシャル場における安定化形態の解析を行った. この考え方を発展させ, その逆問題として安定化形態を設計することが可能となれば, ポテンシャル場の下ではこのような構造を持つ適応トラスを用いた場合でも目標とする形態を達成することが期待される.

現在, 適応トラスは知的適応構造物, 柔軟ロボットアームなどの分野での応用が考えられている. 比較的整えられた環境の下で利用されてきたこれまでの機械システムとは異なり, 環境に適応しつつ目的を達成する能力を持つことがこれらの分野における機械システムへの要求のひとつに挙げられている. 本論文では, 適応トラスをこのような柔軟な適応性を持つ機械システムとして利用するために必要となる, 多くの自由度を保有するための機構およびそれらの自由度を状況に応じて活用することにより適応性を発揮するためのしくみについて議論を行った. 取り上げた諸問題とそれらに対するアプローチは, 高多自由度機械システムを取り扱うための基礎を与えるものであり, これらの分野の発展の一段階をなすものであると考える.

付録

A.1 概念モデルの増分形機構関係

2.2.2節で示した増分関係の記述に必要なヤコビ行列を求める.

概念モデルの幾何学的関係式 (2.1) の全微分は

$$d\boldsymbol{L}_n = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n} d\boldsymbol{X}_n + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} d\boldsymbol{X}_{n-3} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} d\boldsymbol{X}_{n-2} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} d\boldsymbol{X}_{n-1} \tag{A.1}$$

となる. ここで,

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n} = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_{n1}}(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-3})^T \\ \frac{1}{l_{n2}}(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-2})^T \\ \frac{1}{l_{n3}}(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-1})^T \end{bmatrix} \tag{A.2}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{l_{n1}}(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-3})^T \\ \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} \end{bmatrix} \tag{A.3}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{O} \\ -\frac{1}{l_{n2}}(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-2})^T \\ \boldsymbol{O} \end{bmatrix} \tag{A.4}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} \\ -\frac{1}{l_{n3}}(\boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-1})^T \end{bmatrix} \tag{A.5}$$

である. 概念モデルのトラスモジュールの機構関係式 (2.2) の全微分は

$$d\boldsymbol{X}_n = \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} d\boldsymbol{L}_n + \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} d\boldsymbol{X}_{n-3} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} d\boldsymbol{X}_{n-2} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} d\boldsymbol{X}_{n-1} \quad (2.5)$$

と表されるから, 式 (A.1) より,

$$\begin{aligned} d\boldsymbol{X}_n = & \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} d\boldsymbol{L}_n - \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} d\boldsymbol{X}_{n-3} \\ & - \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} d\boldsymbol{X}_{n-2} - \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} d\boldsymbol{X}_{n-1} \quad (A.6) \end{aligned}$$

とし, 式 (2.5) と式 (A.6) の係数比較より,

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \quad (A.7)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \quad (A.8)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} \quad (A.9)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} \quad (A.10)$$

が得られる. これらのトラスモジュール毎のヤコビ行列を式 (2.8) に示すように組み合わせることにより, 適応トラス全体の増分関係式 (2.6) に必要なヤコビ行列$\boldsymbol{J}^{XL}$が得られる.

A.2 実モデルの増分形機構関係

2.3.2節で示した適応トラスの実モデルの増分形機構関係の導出に必要な式 (2.21) および (2.22) の全微分

$$\begin{aligned} d\boldsymbol{X}_n = & \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} d\boldsymbol{L}_n \\ & + \sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-4+k}} d\boldsymbol{X}_{n-4+k} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-4+k}} d\boldsymbol{Q}_{n-4+k} \right] \quad (2.26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\boldsymbol{Q}_n = & \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} d\boldsymbol{L}_n \\ & + \sum_{k=1}^{3} \left[\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-4+k}} d\boldsymbol{X}_{n-4+k} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-4+k}} d\boldsymbol{Q}_{n-4+k} \right] \quad (2.27) \end{aligned}$$

の各項のヤコビ行列を求める. まず, 式 (2.13) について

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial \boldsymbol{X}_n} = \boldsymbol{I}_3 \quad (A.11)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} = \frac{\partial (\boldsymbol{Q}_n \boldsymbol{S}_{n,a}^{(n)})}{\partial \boldsymbol{Q}_n} \quad (A.12)$$

となる. 式 (A.12) は 3 階のテンソルとなる. これは, 本質的には$\boldsymbol{Q}_n$を表す節点姿勢角$\boldsymbol{\Theta}_n$を考えれば 3×3 のヤコビ行列となるが, これらの値はここで行う導出においては補助的なものであるため, 以上のような記述により議論を進める. 式 (2.17) については

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n} &= \frac{\partial (\boldsymbol{Q}_{n-3} \mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3}))}{\partial \boldsymbol{A}_n} \\ &= \left[\boldsymbol{Q}_{n-3} \frac{\partial \mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3})}{\partial \alpha_{n-3}}, \right. \\ & \qquad \left. \boldsymbol{Q}_{n-3} \frac{\partial \mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3})}{\partial \beta_{n-3}}, \boldsymbol{O}_{3\times 3} \right] \quad (A.13) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = \frac{\partial (\boldsymbol{Q}_{n-3} \mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3}))}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \quad (A.11)$$

が得られる. ここで, 式 (A.13) および (A.14) はそれぞれ 3 階および 4 階のテンソルとなる. 次に, 式 (2.18) については, 式 (2.17) および (A.13) を参照して

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n} &= \frac{\partial(\boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0,\beta_{n-3},\alpha_{n-3})[0,0,l_{n1}]^T)}{\partial \boldsymbol{A}_n} \\
&= \frac{\partial(\boldsymbol{Q}_n^A[0,0,l_{n1}]^T)}{\partial \boldsymbol{A}_n} \\
&= \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}[0,0,l_{n1}]^T + \boldsymbol{Q}_n\frac{\partial[0,0,l_{n1}]^T}{\partial \boldsymbol{A}_n} \\
&= \left[\boldsymbol{Q}_{n-3}\frac{\partial \mathbf{RPY}(0,\beta_{n-3},\alpha_{n-3})}{\partial \alpha_{n-3}}\begin{bmatrix}0\\0\\l_{n1}\end{bmatrix},\right. \\
&\qquad \left.\boldsymbol{Q}_{n-3}\frac{\partial \mathbf{RPY}(0,\beta_{n-3},\alpha_{n-3})}{\partial \beta_{n-3}}\begin{bmatrix}0\\0\\l_{n1}\end{bmatrix},\boldsymbol{O}_3\right] \\
&\qquad +\boldsymbol{Q}_n\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{bmatrix} \qquad \text{(A.15)}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \boldsymbol{I}_3 \qquad \text{(A.16)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = \frac{\partial(\boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0,\beta_{n-3},\alpha_{n-3})[0,0,l_{n1}]^T)}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \qquad \text{(A.17)}$$

となる. 式 (A.17) は 3 階のテンソルである. これらを用いて, 逆関係である式 (2.23) についてのヤコビ行列を求める. 式 (A.1)–(A.10) と同様の手順により, 次式が得られる.

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \qquad \text{(A.18)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \qquad \text{(A.19)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \qquad \text{(A.20)}$$

式 (2.14) については, 式 (A.11) を参照して

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_n} = \begin{bmatrix}\frac{1}{l_{n1}}(\boldsymbol{X}_{n,-3}-\boldsymbol{X}_{n-3,3})^T\\ \frac{1}{l_{n2}}(\boldsymbol{X}_{n,-2}-\boldsymbol{X}_{n-2,2})^T\\ \frac{1}{l_{n3}}(\boldsymbol{X}_{n,-1}-\boldsymbol{X}_{n-1,1})^T\end{bmatrix} \qquad \text{(A.21)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{O}\\ \frac{1}{l_{n2}}(\boldsymbol{X}_{n,-2}-\boldsymbol{X}_{n-2,2})^T\frac{\partial \boldsymbol{X}_{n,-2}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\\ \frac{1}{l_{n3}}(\boldsymbol{X}_{n,-1}-\boldsymbol{X}_{n-1,1})^T\frac{\partial \boldsymbol{X}_{n,-1}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\end{bmatrix} \qquad \text{(A.22)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \begin{bmatrix}-\frac{1}{l_{n1}}(\boldsymbol{X}_{n,-3}-\boldsymbol{X}_{n-3,3})^T\\ \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O}\end{bmatrix} \qquad \text{(A.23)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2,2}} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{O}\\ -\frac{1}{l_{n2}}(\boldsymbol{X}_{n,-2}-\boldsymbol{X}_{n-2,2})^T\\ \boldsymbol{O}\end{bmatrix} \qquad \text{(A.24)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2,2}}\frac{\partial \boldsymbol{X}_{n-2,2}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} \qquad \text{(A.25)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1,1}} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O}\\ -\frac{1}{l_{n3}}(\boldsymbol{X}_{n,-1}-\boldsymbol{X}_{n-1,1})^T\end{bmatrix} \qquad \text{(A.26)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1,1}}\frac{\partial \boldsymbol{X}_{n-1,1}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} \qquad \text{(A.27)}$$

となる. また, 式 (2.19) の増分関係が,

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_n}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n} \qquad \text{(A.28)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_n}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \qquad \text{(A.29)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_n}\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \qquad \text{(A.30)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} \tag{A.31}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} \tag{A.32}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} \tag{A.33}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} \tag{A.34}$$

となり, この逆関係である式 (2.20) の増分関係が A.1節の式 (2.5)–(A.10) と同様の手順により得られる.

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \tag{A.35}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \tag{A.36}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \tag{A.37}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} \tag{A.38}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} \tag{A.39}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} \tag{A.40}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} \tag{A.41}$$

以上の増分関係から, 適応トラスの実モデルのトラスモジュールの機構関係式 (2.21), (2.22) および (2.24) についての増分関係の記述に必要なヤコビ行列が得られる. まず, 式 (2.24) については

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_n} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n} \tag{A.42}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} + \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \tag{A.43}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\left(\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}}\right) \tag{A.44}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} \tag{A.45}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} \tag{A.46}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} \tag{A.47}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} \tag{A.48}$$

となり, これを用いて逆関係である式 (2.21) の増分関係を A.1節の式 (2.5)–(A.10) と同様の手順により求める.

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \tag{A.49}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = -\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \tag{A.50}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} = -\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \tag{A.51}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = -\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} \tag{A.52}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = -\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} \tag{A.53}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = -\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} \tag{A.54}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{X}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = -\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^X}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} \tag{A.55}$$

さらに, 式 (2.22) については

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n} \tag{A.56}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\left(-\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}}\right)$$

$$= -\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-3}} \tag{A.57}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} &= \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \\ &= \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\left(-\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}}\right) + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \\ &= -\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-3}} \end{aligned} \tag{A.58}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} &= \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^A}{\partial \boldsymbol{A}_n}\left(-\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}}\right) \\ &= -\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-2}} \end{aligned} \tag{A.59}$$

となり, 以下同様にして,

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} = -\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-2}} \tag{A.60}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} = -\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{X}_{n-1}} \tag{A.61}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} = -\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^L}{\partial \boldsymbol{L}_n}\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^A}{\partial \boldsymbol{Q}_{n-1}} \tag{A.62}$$

として, 式 (2.26) および (2.27) に示す増分関係の記述に必要なヤコビ行列が得られる.

A.3 作業空間ベクトルの取り扱い

2.4.1節で示したように, 作業空間ベクトル$\boldsymbol{W}$を適応トラス先端の 3 節点の位置$\boldsymbol{X}_T$から求めることは,

$$\boldsymbol{X}_T = \boldsymbol{X}_T^W(\boldsymbol{W}) \tag{2.33}$$

の逆関係として, 形式的には式 (2.35) のように表された. この実際の手順は以下のようになる. ただし, $\boldsymbol{X}_T$を構成する節点位置の値は制約条件式 (2.36) を満たすものでなければならない. まず, 適応トラス先端および基準位置における三角形の重心の位置

$$\boldsymbol{G}_T = \frac{1}{3}(\boldsymbol{X}_{M-2} + \boldsymbol{X}_{M-1} + \boldsymbol{X}_M) \tag{A.63}$$

$$\boldsymbol{G}_B = \frac{1}{3}(\boldsymbol{X}_{-2} + \boldsymbol{X}_{-1} + \boldsymbol{X}_0) \tag{A.64}$$

より,

$$\boldsymbol{X}_W = \boldsymbol{G}_T - \boldsymbol{G}_B \tag{A.65}$$

が得られる. 次に, 作業空間ベクトルの並進量$\boldsymbol{X}_W$および回転量$\boldsymbol{\Theta}_W$によって表される座標系の, 全体座標系 Cを参照した各座標軸方向単位ベ

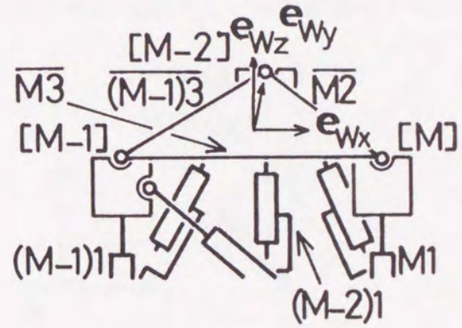


図 A.1: 作業空間ベクトルの$\boldsymbol{X}_W$および$\boldsymbol{\Theta}_W$による座標系の座標軸

クトルの値をe_{Wx}, e_{Wy}, e_{Wz}とすれば,

$$e_{Wx} = \frac{X_M - X_{M-1}}{\|X_M - X_{M-1}\|} \quad (A.66)$$

$$e_{Wy} = \frac{X_{M-2} - G_T}{\|X_{M-2} - G_T\|} \quad (A.67)$$

$$e_{Wz} = e_{Wx} \times e_{Wy} \quad (A.68)$$

であり (図 A.1), 全体座標系 Cにおける各座標軸方向単位ベクトル$e_x = [1, 0, 0]^T$, $e_y = [0, 1, 0]^T$, $e_z = [0, 0, 1]^T$ との間に, 次の関係式

$$[e_{Wx}, e_{Wy}, e_{Wz}] = Q_W[e_x, e_y, e_z] = Q_W I_3 = Q_W \quad (A.69)$$

が成り立つから, 式 (2.34) より,

$$\Theta_W = \mathbf{RPY}^{-1}(Q_W) \quad (A.70)$$

が得られ, 式 (A.65) および (A.70) を形式的にまとめれば,

$$W = W^{X_T}(X_T) \quad (2.35)$$

として作業空間ベクトルを適応トラス先端の 3 節点の位置X_Tにより表すことができる.

A.4 全体座標系 Cから部材座標系 C_{ni}への座標変換

部材 ni の軸方向単位ベクトル (すなわち, 座標系 C_{ni}の z方向単位ベクトル) を$e_{ni} = [e_{nix}, e_{niy}, e_{niz}]^T$ とすれば, 全体座標系 Cにおける z方向単位ベクトル$e_z = [0, 0, 1]^T$ との間に次の関係が成り立つ (図 A.2).

$$e_{ni} = [\mathbf{Rot}(y, \theta_{ni})\mathbf{Rot}(x, \psi_{ni})]e_z \quad (A.71)$$

ここで,

$$\mathbf{Rot}(x, \psi_{ni}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi_{ni} & -\sin\psi_{ni} \\ 0 & \sin\psi_{ni} & \cos\psi_{ni} \end{bmatrix} \quad (A.72)$$

$$\mathbf{Rot}(y, \theta_{ni}) = \begin{bmatrix} \cos\theta_{ni} & 0 & \sin\theta_{ni} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{ni} & 0 & \cos\theta_{ni} \end{bmatrix} \quad (A.73)$$

は指定された軸まわりの回転マトリクス[101], θ_{ni}およびψ_{ni}は全体座標系 Cを参照した座標系 Cの y軸および x 軸まわりの回転角であり, e_{ni}より

$$\cos\theta_{ni} = \frac{e_{niz}}{\sqrt{e_{nix}^2 + e_{niy}^2}} \quad (A.74)$$

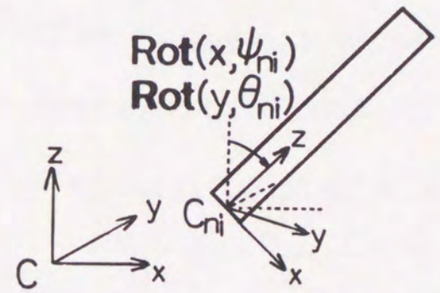


図 A.2: 座標系 C_{ni}と全体座標系 Cとの関係

$$\sin\theta_{ni} = \frac{e_{nix}}{\sqrt{e_{nix}^2 + e_{niy}^2}} \tag{A.75}$$

$$\cos\psi_{ni} = \sqrt{e_{nix}^2 + e_{niy}^2} \tag{A.76}$$

$$\sin\psi_{ni} = e_{niy} \tag{A.77}$$

として求められる. 座標系 C_{ni}は部材 ni の軸方向に z軸をとっているため, C_{ni}を参照した C_{ni}の z軸方向単位ベクトル$\boldsymbol{e}_{zni}^{(ni)}(=\boldsymbol{e}_z)$ と, 全体座標系 Cを参照した座標系 C_{ni}の z軸方向単位ベクトル$\boldsymbol{e}_{zni}(=\boldsymbol{e}_{ni})$ との間の関係式が式 (A.71) より得られる.

$$\boldsymbol{e}_{zni} = [\mathbf{Rot}(y,\theta_{ni})\mathbf{Rot}(x,\psi_{ni})]\boldsymbol{e}_{zni}^{(ni)} \tag{A.78}$$

したがって, 全体座標系 Cから局所座標系 C_{ni}への座標変換は

$$\begin{aligned}\boldsymbol{e}_{zni}^{(ni)} &= [\mathbf{Rot}(y,\theta_{ni})\mathbf{Rot}(x,\psi_{ni})]^{-1}\boldsymbol{e}_{zni} \\ &= [\mathbf{Rot}(x,\psi_{ni})^T\mathbf{Rot}(y,\theta_{ni})^T]\boldsymbol{e}_{zni}\end{aligned} \tag{A.79}$$

となる. 式 (A.79) を参照すれば,

$$\boldsymbol{N}_{ni} = \begin{bmatrix} \mathbf{Rot}(x,\psi_{ni})^T\mathbf{Rot}(y,\theta_{ni})^T & \boldsymbol{O}_{3\times3} \\ \boldsymbol{O}_{3\times3} & \mathbf{Rot}(x,\psi_{ni})^T\mathbf{Rot}(y,\theta_{ni})^T \end{bmatrix} \tag{A.80}$$

として座標変換マトリクス$\boldsymbol{N}_{ni}$が得られる.

A.5 縦部材のたわみとねじれを考慮した機構関係

適応トラスの実モデルでは, 概念モデルの場合と異なり, 弾性変形に際して縦部材のたわみ·ねじれを考慮する必要がある. ここでは, これに対応した実モデルの機構関係式の拡張について述べる.

A.5.1 縦部材のたわみ·ねじれの導入による機構関係式の拡張

2.3.2節を参照して, 3.3.1節で導入した縦部材 $n1$ のたわみ角·ねじれ角 $\boldsymbol{Y}_n$を「機構的に」与えることができるとした場合の実モデルのトラスモジュールの機構関係式を導く. すなわち, 2.3.2節において機構運動を記述した変数に

$\boldsymbol{Y}_n = [y_{nx}, y_{ny}, y_{nz}]^T$ 節点座標系 C_nを参照した縦部材 $n1$ のたわみ角 y_{nx}, y_{ny}およびねじれ角 y_{nz}

を加えて議論を拡張する.

機構的な縦部材 $n1$ のたわみ角·ねじれ角$\boldsymbol{Y}_n$の導入により, 式 (2.17) が次のように書き改められる.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Q}_n &= \boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0,\beta_{n-3},\alpha_{n-3})\mathbf{RPY}(y_{nz},y_{ny},y_{nx}) \\ &= \boldsymbol{Q}_n^{AY}(\boldsymbol{A}_n,\boldsymbol{Y}_n;\boldsymbol{Q}_{n-3})\end{aligned} \tag{A.81}$$

これにしたがって, 関連する他の式を書き改める. 式 (2.19) より,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L}_n &= \boldsymbol{L}_n^{XQ}(\boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n;\boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3}),\boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n,\boldsymbol{Y}_n;\boldsymbol{Q}_{n-3}); \\ &\qquad \boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1}) \\ &= \boldsymbol{L}_n^{AY}(\boldsymbol{A}_n,\boldsymbol{Y}_n; \\ &\qquad \boldsymbol{X}_{n-3},\boldsymbol{Q}_{n-3},\boldsymbol{X}_{n-2},\boldsymbol{Q}_{n-2},\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{Q}_{n-1})\end{aligned} \tag{A.82}$$

となり，これを$\boldsymbol{A}_n$について解くことにより，

$$\boldsymbol{A}_n = \boldsymbol{A}_n^{LY}(\boldsymbol{L}_n, \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{Q}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}, \boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad \text{(A.83)}$$

が得られる．式 (2.18) および (A.81) に式 (A.83) を代入することにより，縦部材 $n1$ のたわみ角·ねじれ角を考慮したトラスモジュールの実モデルの順機構関係式が

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{X}_n &= \boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}) \\
&= \boldsymbol{X}_n^A(\boldsymbol{A}_n^{LY}(\boldsymbol{L}_n, \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{Q}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}, \boldsymbol{Q}_{n-1}); \\
&\qquad \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}) \\
&= \boldsymbol{X}_n^{LY}(\boldsymbol{L}_n, \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{Q}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}, \boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad \text{(A.84)} \\
\boldsymbol{Q}_n &= \boldsymbol{Q}_n^{AY}(\boldsymbol{A}_n, \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{Q}_{n-3}) \\
&= \boldsymbol{Q}_n^{AY}(\boldsymbol{A}_n^L(\boldsymbol{L}_n, \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{Q}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}, \boldsymbol{Q}_{n-1}), \\
&\qquad \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{Q}_{n-3}) \\
&= \boldsymbol{Q}_n^{LY}(\boldsymbol{L}_n, \boldsymbol{Y}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{Q}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{Q}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}, \boldsymbol{Q}_{n-1}) \quad \text{(A.85)}
\end{aligned}$$

として得られる．

A.5.2 動力学解析に必要な増分関係式の導出

3.3.2節で述べた剛性マトリクスを求めるために必要な増分関係式を導出する．式 (3.85) より

$$\boldsymbol{J}^{DH^*} = \left.\frac{\partial \boldsymbol{D}^*}{\partial \boldsymbol{H}^*}\right|_{\boldsymbol{H}^*=\boldsymbol{L}^*} = \frac{\partial \boldsymbol{X}^*}{\partial \boldsymbol{L}^*} = \boldsymbol{J}^{XL^*} \quad \text{(A.86)}$$

ここで，$\boldsymbol{J}^{XL^*}$は，式 (2.29) に示した剛体運動モデルに基づく実モデルの機構関係についてのヤコビ行列$\boldsymbol{J}^{XL}$を，節点部姿勢角および縦部材のたわみ·ねじれを考慮して，前節で導いた機構関係式にしたがって拡張した

ものである．ただし，$\boldsymbol{H}^* = \boldsymbol{L}^*$であるから，$\boldsymbol{Y}_n = \boldsymbol{O}_3$である場合のヤコビ行列について考えればよい．式 (A.81) より，

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{Q}_n &= \boldsymbol{Q}_n^{AY}(\boldsymbol{A}_n, \boldsymbol{O}_3; \boldsymbol{Q}_{n-3}) \\
&= \boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3})\mathbf{RPY}(\boldsymbol{O}_3) \\
&= \boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3})\boldsymbol{I}_3 \\
&= \boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n; \boldsymbol{Q}_{n-3})\boldsymbol{I}_3 = \boldsymbol{Q}_n^A(\boldsymbol{A}_n; \boldsymbol{Q}_{n-3}) \quad \text{(A.87)}
\end{aligned}$$

となるから，$\boldsymbol{A}_n$および$\boldsymbol{Q}_{n-3}$についての増分関係はA.2節で導いたものと等しくなる．新たに必要となる増分関係は，

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} = \frac{\partial(\boldsymbol{Q}_{n-3}\mathbf{RPY}(0, \beta_{n-3}, \alpha_{n-3})\mathbf{RPY}(\boldsymbol{Y}_n))}{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{Y}_n)} \frac{\partial \mathbf{RPY}(\boldsymbol{Y}_n)}{\partial \boldsymbol{Y}_n} \quad \text{(A.88)}$$

およびこれに関連する式の$\boldsymbol{Y}_n$についての拡張となる．また，その他の変数 ($\boldsymbol{L}_n$, $\boldsymbol{X}_n$, $\boldsymbol{X}_{n-3}$, $\boldsymbol{X}_{n-2}$, $\boldsymbol{X}_{n-1}$, $\boldsymbol{Q}_n$, $\boldsymbol{Q}_{n-3}$, $\boldsymbol{Q}_{n-2}$, $\boldsymbol{Q}_{n-1}$) についてのヤコビ行列は，変形を考慮しない場合 (A.2節) と等しい．式 (A.82) より，

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{XQ}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} \quad \text{(A.89)}$$

となる．これより，式 (A.35)-(A.41) および式 (A.83) より，

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{A}_n}\right)^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{L}_n} \frac{\partial \boldsymbol{L}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} \quad \text{(A.90)}$$

が得られる．ここで，$\boldsymbol{L}_n$についてのヤコビ行列は，$\boldsymbol{Y}_n = \boldsymbol{O}_3$より，

$$\frac{\partial \boldsymbol{A}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{L}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{A}_n^{L}}{\partial \boldsymbol{L}_n} \quad \text{(A.91)}$$

である．以上を用いて，式 (A.84) および (A.85) の関数$\boldsymbol{X}_n^{LY}$および$\boldsymbol{Q}_n^{LY}$の増分関係を表すヤコビ行列を考えれば，$\boldsymbol{Y}_n$については

$$\frac{\partial \boldsymbol{X}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{X}_n^{A}}{\partial \boldsymbol{A}_n} \frac{\partial \boldsymbol{A}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} \quad \text{(A.92)}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{A}_n} \frac{\partial \boldsymbol{A}_n^{LY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} + \frac{\partial \boldsymbol{Q}_n^{AY}}{\partial \boldsymbol{Y}_n} \quad \text{(A.93)}$$

となり, $\boldsymbol{L}_n$, $\boldsymbol{X}_{n-3}$, $\boldsymbol{X}_{n-2}$, $\boldsymbol{X}_{n-1}$, $\boldsymbol{Q}_{n-3}$, $\boldsymbol{Q}_{n-2}$, $\boldsymbol{Q}_{n-1}$については式(A.49)–(A.62)の関数$\boldsymbol{X}_n^L$および$\boldsymbol{Q}_n^L$のヤコビ行列と等しい.

適応トラス全体では,

$$\boldsymbol{J}^{XL^*} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{11}^{XL^*} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{J}_{M1}^{XL^*} & \cdots & \boldsymbol{J}_{MM}^{XL^*} \end{bmatrix} \tag{A.94}$$

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{XL^*} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{ij}^{XL} & \boldsymbol{J}_{ij}^{XY} \\ \boldsymbol{J}_{ij}^{\Theta L} & \boldsymbol{J}_{ij}^{\Theta Y} \end{bmatrix} \tag{A.95}$$

として変形を考慮した機構関係式の増分関係を表すヤコビ行列が得られる. ここで,

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{XL} = \frac{\partial \boldsymbol{X}_i}{\partial \boldsymbol{L}_j} = \begin{cases} \displaystyle\sum_{a=-3}^{-1} \left[\frac{\partial \boldsymbol{X}_i^{LY}}{\partial \boldsymbol{X}_{i+a}} \frac{\partial \boldsymbol{X}_{i+a}}{\partial \boldsymbol{L}_j} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_i^{LY}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i+a}} \frac{\partial \boldsymbol{Q}_{i+a}}{\partial \boldsymbol{L}_j} \right] \\ = \displaystyle\sum_{a=-3}^{-1} \left[\frac{\partial \boldsymbol{X}_i^{LY}}{\partial \boldsymbol{X}_{i+a}} \boldsymbol{J}_{(i+a)j}^{XL} + \frac{\partial \boldsymbol{X}_i^{LY}}{\partial \boldsymbol{Q}_{i+a}} \boldsymbol{J}_{(i+a)j}^{QL} \right] & (i > j) \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{X}_i^{LY}}{\partial \boldsymbol{L}_j} & (i = j) \\ \boldsymbol{O} & (i < j) \end{cases} \tag{A.96}$$

であり,

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{XY} = \frac{\partial \boldsymbol{X}_i}{\partial \boldsymbol{Y}_j} \tag{A.97}$$

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{QL} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_i}{\partial \boldsymbol{L}_j} \tag{A.98}$$

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{QY} = \frac{\partial \boldsymbol{Q}_i}{\partial \boldsymbol{Y}_j} \tag{A.99}$$

についても同様である. また, Θに関しては,

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{\Theta L} = \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}_i}{\partial \boldsymbol{Q}_i} \boldsymbol{J}_{ij}^{QL} \tag{A.100}$$

$$\boldsymbol{J}_{ij}^{\Theta Y} = \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}_i}{\partial \boldsymbol{Q}_i} \boldsymbol{J}_{ij}^{QY} \tag{A.101}$$

として得られる. ただし,

$$\frac{\partial \boldsymbol{\Theta}_i}{\partial \boldsymbol{Q}_i} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{Q}_i}{\partial \boldsymbol{\Theta}_i} \right)^- \tag{A.102}$$

である. ここで, $(\,)^-$は反射形の一般逆行列を表す.

A.6　ジョイント回転角の余弦の増分関係

A.6.1　可到達範囲の探索に用いる場合

2.3節で導入した適応トラスの実モデルにおいて，ジョイントn,aの回転角の余弦$\lambda_{n,a}$とトラスモジュールjの部材長$\boldsymbol{L}_j$との間の増分関係を表すヤコビ行列$\partial\lambda_{n,a}/\partial\boldsymbol{L}_j$は，式(6.16)–(6.18)およびA.2節を参照すれば，

$$\frac{\partial\lambda_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} = \begin{cases} -\boldsymbol{e}^T_{n(4+a)}\dfrac{\partial\boldsymbol{e}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} - \boldsymbol{e}^T_{n,a}\dfrac{\partial\boldsymbol{e}_{n(4+a)}}{\partial\boldsymbol{L}_j} & (a=-2,-1) \\ \boldsymbol{e}^T_{(n+a)(4-a)}\dfrac{\partial\boldsymbol{e}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} + \boldsymbol{e}^T_{n,a}\dfrac{\partial\boldsymbol{e}_{(n+a)(4-a)}}{\partial\boldsymbol{L}_j} & (a=1,2,3) \end{cases} \tag{A.103}$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{e}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} = \frac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\frac{\partial\boldsymbol{Q}_n}{\partial\boldsymbol{L}_j} \tag{A.104}$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{e}_{ni}}{\partial\boldsymbol{L}_j} = \frac{1}{l_{ni}}\left(\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,-4+i}}{\partial\boldsymbol{L}_j} - \frac{\partial\boldsymbol{X}_{n-4+i,4-i}}{\partial\boldsymbol{L}_j}\right) - \delta_{nj}\frac{\boldsymbol{e}_{ni}}{l_{ni}}[\delta_{1i},\delta_{2i},\delta_{3i}] \tag{A.105}$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} = \frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\frac{\partial\boldsymbol{Q}_n}{\partial\boldsymbol{L}_j} + \frac{\partial\boldsymbol{X}_n}{\partial\boldsymbol{L}_j} \tag{A.106}$$

となる．式(A.103)に(A.104)–(A.106)を代入し，式(2.30)および(2.31)を用いて整理すれば，

$$\begin{aligned}\frac{\partial\lambda_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} &= -\boldsymbol{e}^T_{n(4+a)}\frac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\boldsymbol{J}^{QL}_{nj} - \frac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\left(\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\boldsymbol{J}^{QL}_{nj}\right. \\ &\quad + \boldsymbol{J}^{XL}_{nj} - \frac{\partial\boldsymbol{X}_{n+a,-a}}{\partial\boldsymbol{Q}_{n+a}}\boldsymbol{J}^{QL}_{(n+a)j} - \boldsymbol{J}^{XL}_{(n+a)j} \\ &\quad \left. - \delta_{nj}\boldsymbol{e}_{n(4+a)}[\delta_{1(4+a)},\delta_{2(4+a)},\delta_{3(4+a)}]\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= -\frac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{J}^{XL}_{nj} - \left(\frac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\right. \\ &\quad \left. + \boldsymbol{e}^T_{n(4+a)}\frac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\right)\boldsymbol{J}^{QL}_{nj} \\ &\quad + \frac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{J}^{XL}_{(n+a)j} + \frac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n+a,-a}}{\partial\boldsymbol{Q}_{n+a}}\boldsymbol{J}^{QL}_{(n+a)j} \\ &\quad + \delta_{nj}\frac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{e}_{n(4+a)}[\delta_{1(4+a)},\delta_{2(4+a)},\delta_{3(4+a)}] \\ &\qquad\qquad (a=-2,-1)\end{aligned} \tag{A.107}$$

および

$$\begin{aligned}\frac{\partial\lambda_{n,a}}{\partial\boldsymbol{L}_j} &= \boldsymbol{e}^T_{(n+a)(4-a)}\frac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\boldsymbol{J}^{QL}_{nj} \\ &\quad + \frac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\left(\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n+a,-a}}{\partial\boldsymbol{Q}_{n+a}}\boldsymbol{J}^{QL}_{(n+a)j} + \boldsymbol{J}^{XL}_{(n+a)j}\right. \\ &\quad - \frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\boldsymbol{J}^{QL}_{nj} - \boldsymbol{J}^{XL}_{nj} \\ &\quad \left. - \delta_{(n+a)j}\boldsymbol{e}_{(n+a)(4-a)}[\delta_{1(4-a)},\delta_{2(4-a)},\delta_{3(4-a)}]\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= -\frac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{J}^{XL}_{nj} \\ &\quad - \left(\frac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\right. \\ &\quad \left. - \boldsymbol{e}^T_{(n+a)(4-a)}\frac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial\boldsymbol{Q}_n}\right)\boldsymbol{J}^{QL}_{nj} \\ &\quad + \frac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{J}^{XL}_{(n+a)j} \\ &\quad + \frac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\frac{\partial\boldsymbol{X}_{n+a,-a}}{\partial\boldsymbol{Q}_{n+a}}\boldsymbol{J}^{QL}_{(n+a)j} \\ &\quad - \delta_{(n+a)j}\frac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a} \\ &\qquad \boldsymbol{e}_{(n+a)(4-a)}[\delta_{1(4-a)},\delta_{2(4-a)},\delta_{3(4-a)}] \\ &\qquad\qquad (a=1,2,3)\end{aligned} \tag{A.108}$$

が得られ, 次のようにまとめられる.

$$\frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{L}_j} = \boldsymbol{C}^X_{n,a}\boldsymbol{J}^{XL}_{nj} + \boldsymbol{C}^Q_{n,a}\boldsymbol{J}^{QL}_{nj} + \boldsymbol{C}^{Xa}_{n,a}\boldsymbol{J}^{XL}_{(n+a)j} + \boldsymbol{C}^{Qa}_{n,a}\boldsymbol{J}^{QL}_{(n+a)j} + \boldsymbol{C}^l_{n,a} \quad \text{(A.109)}$$

ここで,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}^X_{n,a} &= \frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{X}_n} \\ &= \begin{cases} -\dfrac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a} & (a=-2,-1) \\ -\dfrac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a} & (a=1,2,3) \end{cases}\end{aligned} \quad \text{(A.110)}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}^Q_{n,a} &= \frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} \\ &= \begin{cases} -\left(\dfrac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} + \boldsymbol{e}^T_{n(4+a)}\dfrac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\right) & (a=-2,-1) \\ -\left(\dfrac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} - \boldsymbol{e}^T_{(n+a)(4-a)}\dfrac{\partial(\boldsymbol{Q}_n\boldsymbol{e}^{(n)}_{n,a})}{\partial \boldsymbol{Q}_n}\right) & (a=1,2,3) \end{cases}\end{aligned} \quad \text{(A.111)}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}^{Xa}_{n,a} &= \frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{X}_{n+a}} \\ &= \begin{cases} \dfrac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a} & (a=-2,-1) \\ \dfrac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a} & (a=1,2,3) \end{cases}\end{aligned} \quad \text{(A.112)}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}^{Qa}_{n,a} &= \frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n+a}} \\ &= \begin{cases} \dfrac{1}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{n+a,-a}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n+a}} & (a=-2,-1) \\ \dfrac{1}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\dfrac{\partial \boldsymbol{X}_{n+a,-a}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n+a}} & (a=1,2,3) \end{cases}\end{aligned} \quad \text{(A.113)}$$

$$\boldsymbol{C}^l_{n,a} = \begin{cases} \dfrac{\delta_{nj}}{l_{n(4+a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{e}_{n(4+a)}[\delta_{1(4+a)}, \delta_{2(4+a)}, \delta_{3(4+a)}] & (a=-2,-1) \\ -\dfrac{\delta_{(n+a)j}}{l_{(n+a)(4-a)}}\boldsymbol{e}^T_{n,a}\boldsymbol{e}_{(n+a)(4-a)}[\delta_{1(4-a)}, \delta_{2(4-a)}, \delta_{3(4-a)}] & (a=1,2,3) \end{cases} \quad \text{(A.114)}$$

である.

A.6.2 安定化形態の解析に用いる場合

前節の式 (A.110)–(A.113) より

$$\frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{X}_n} = \boldsymbol{C}^X_{n,a} \quad \text{(A.115)}$$

$$\frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_n} = \boldsymbol{C}^Q_{n,a} \quad \text{(A.116)}$$

$$\frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{X}_{n+a}} = \boldsymbol{C}^{Xa}_{n,a} \quad \text{(A.117)}$$

$$\frac{\partial \lambda_{n,a}}{\partial \boldsymbol{Q}_{n+a}} = \boldsymbol{C}^{Qa}_{n,a} \quad \text{(A.118)}$$

が得られる. ただし, 前節の場合とは異なり, $(a=-3)$ についてもこれらのヤコビ行列は意味を持つ.

A.7 ニューラルネットワークを用いた動作誘導における不等式制約の取り扱い

適応トラスの動作誘導における不等式制約条件として

$$\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B) \leq \underline{\boldsymbol{Z}} \tag{A.119}$$

を考える. ここで, $\boldsymbol{Z} = [z_1, \cdots, z_Z]^T$は制約値ベクトル, $\underline{\boldsymbol{Z}} = [\underline{z_1}, \cdots, \underline{z_Z}]^T$は制約目標値ベクトルを表す. この場合には, 逆機構問題 (4.11) は次のように書き改められる.

$$\begin{aligned} &\text{Find} \quad \boldsymbol{L} \quad \text{such that} \quad \boldsymbol{W}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B) = \underline{\boldsymbol{W}} \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{Z}(\boldsymbol{L};\boldsymbol{X}_B) \leq \underline{\boldsymbol{Z}} \end{aligned} \tag{A.120}$$

これに従い, 4.2.2節で用いた式 (4.12) に示す最小化問題を構成するための誤差関数を

$$E_{WZ} = E_W + E_Z \tag{A.121}$$

と修正する. ここで,

$$E_Z = \sum_{i=1}^{Z} E_{Zi} \tag{A.122}$$

図 A.3: 不等式制約条件を含めたネットワーク NNKI

$$E_{Zi} = \begin{cases} \frac{1}{2}(z_i - \underline{z_i})^2 & (z_i > \underline{z_i}) \\ 0 & (z_i \leq \underline{z_i}) \end{cases} \tag{A.123}$$

である. 4.2.2節 (1)で述べた手順において, ネットワーク NNK の替わりに図 A.3に示すネットワーク NNKI (Neural Network for Kinematics including Inequality constraint) を考え, 式 (4.12) に示す誤差関数の替わりに式 (A.121) の誤差関数を用いれば, 不等式制約条件 (A.119) を含めた逆機構問題をニューラルネットワークを用いて解くことができる.

A.8　ニューラルネットワークのモジュール化構成の実際

適応トラスのトラスモジュールの機構関係式は,

$$\boldsymbol{X}_n = \boldsymbol{X}_n^L(\boldsymbol{L}_n; \boldsymbol{X}_{n-3}, \boldsymbol{X}_{n-2}, \boldsymbol{X}_{n-1}) \tag{2.2}$$

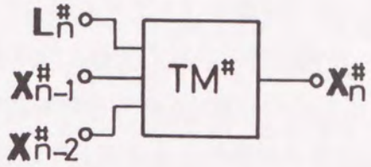
によって表される. 4.3.1節で述べた適応トラスの機構関係を表すニューラルネットワークNNKは, この式(2.2)を表すネットワークモジュールTMを適応トラスの機構学的構成にしたがって組み合わせることにより構成された. しかしながら, ニューロンの出力は図4.2に示すように限られた範囲の値しか取り得ないため, 式(2.2)の関係をそのままネットワークモジュールに学習させることは, スケーリング値を用いた手法では様々な規模の適応トラスに対する一般性を損なう恐れがある. そこで, 節点の絶対位置を用いて表した式(2.2)を, 次のように節点間の相対位置を用いた形式

$$\boldsymbol{X}_n^{\#} = \boldsymbol{X}_n^{L\#}(\boldsymbol{L}_n; \boldsymbol{X}_{n-2}{}^{\#}, \boldsymbol{X}_{n-1}{}^{\#}) \tag{A.124}$$

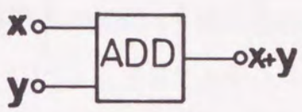
に書き改める. ただし, ここで

$$\boldsymbol{X}_n^{\#} = \boldsymbol{X}_n - \boldsymbol{X}_{n-1} \tag{A.125}$$

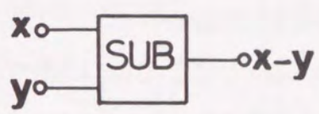
である. 式(A.124)の関係に対応するネットワークモジュールTM#を図A.4(a)に示す. このようなTM#と図A.4(b)に示す加算のためのネットワークモジュールADD, および図A.4(c)に示す減算のためのネットワークモジュールSUBを図A.4(d)に示すように組み合わせることにより, 図4.3(a)に示したものと等価なネットワークモジュールTMを構成することができる. なお, ここで用いた二つのネットワークモジュール, ADDおよびSUBは, 線形の特性関数と正および負の単位結合重みを用いて学習処理を行うことなく先見的に構成することができる.



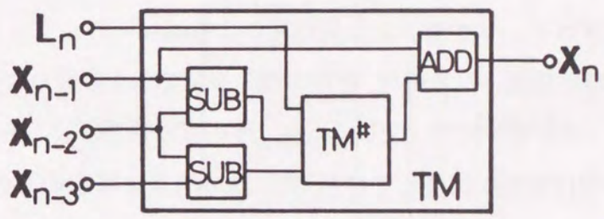
(a) 相対的機構関係を表すTM#



(b) 和を出力するADD



(c) 差を出力するSUB



(d) トラスモジュールに対応するTMの構成

図A.4: ニューロンの出力範囲を考慮したネットワークの構成

A.9　並列処理による提案した動作誘導手法の実現について

ニューラルネットワークは人間の脳の研究から生まれてきた情報処理モデルである．人間の脳の場合には，その神経細胞 (ニューロン) の数は 10^{10}程度であり，ひとつの神経細胞はシナプス結合により 10^3–10^5の他の細胞との接続を持つ．神経組織における情報の伝達および処理の速度は高々数 ms であるが，これらの非常に多数の神経細胞による大規模並列処理により，人間の脳は高度の情報処理を実現している[137]．このような大規模並列処理による人工的ニューラルネットワークの研究[41]や光を用いたニューロン素子の研究[3]も行われているが，多数のシナプス結合などをハードウェアとして実現することは現在の段階では困難であり，比較的小規模の並列処理システムによるニューラルネットワークの実現が試みられている[61]．ここでは，4.3節で導入したニューラルネットワークのモジュール化構成に着目し，これらのネットワークモジュールを基本処理単位とした並列処理の手法の可能性について考察する．

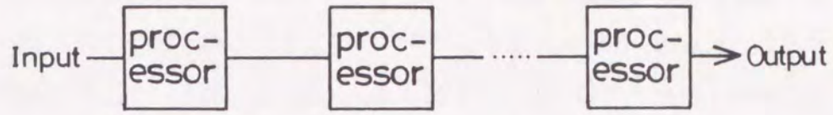
A.9.1　ニューラルネットワークの並列処理様式

複数のプロセッサを用いた並列処理によりニューラルネットワークを実現する際に問題となるのは，処理の基本単位である多数のニューロンの各プロセッサへの割り当てと，プロセッサ相互の情報伝達である．これらは処理効率に密接に関連しており，特に次の二点に留意する必要がある．

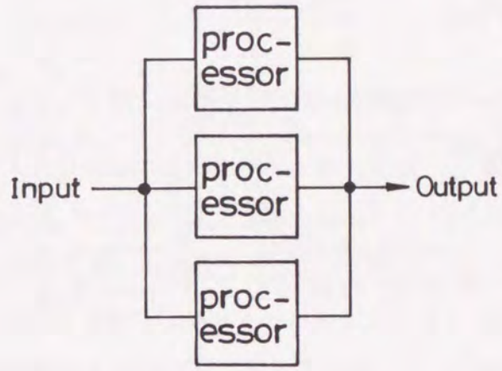
1. 特定のプロセッサに処理が集中することを避けるために全てのプロセッサが同程度のニューロンの処理を受け持つこと．

2. 個々のニューロンが多数の他のニューロンと相互に結合を持っていることに起因するプロセッサ間通信における通信量の軽減．

情報処理を複数のプロセッサにより並列に行うための基本的な様式は，直列接続と並列接続である．直列接続は図 A.5(a) に示すようにプロセッサを直列に配置したもので，各々のプロセッサはその入力側のプロセッサから受け取った情報を加工して次のプロセッサへと出力する．直列接続が有効であるのは，多数のデータに対して複数の処理を逐次的に行う場合である．並列接続は図 A.5(b) に示すようにプロセッサを並列に配置したもので，各々のプロセッサはそれぞれ独立して情報を受け取り，処理を行う．並列接続が有効であるのは，多数の独立した処理を行う場合である．



(a) 直列接続



(b) 並列接続

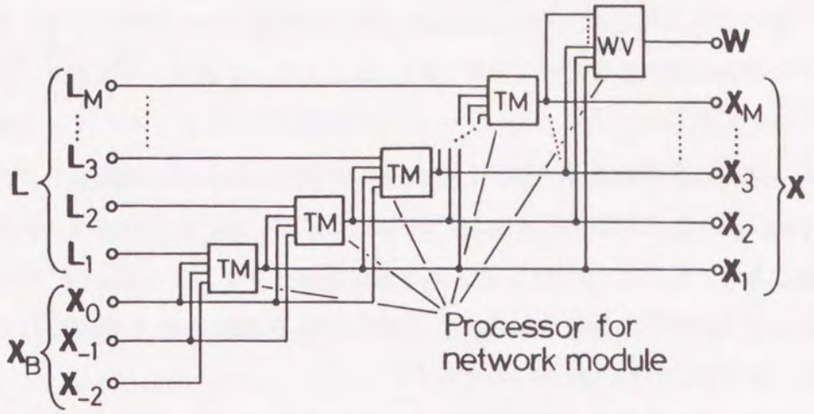
図 A.5: 基本的な並列処理様式

並列処理様式としては, これらを基本としてパイプライン, プロセッサアレイ, 共有メモリ, データフロー, シストリックアレイなどが考えられている[47].

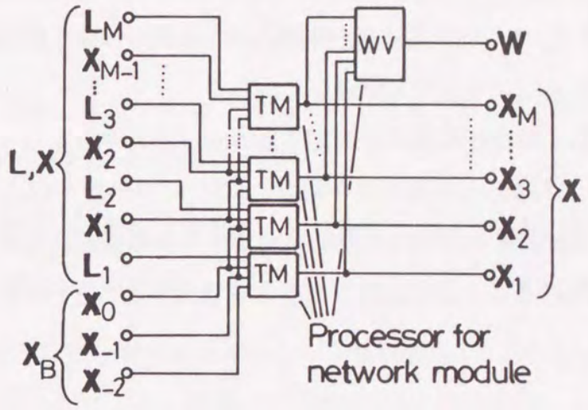
ニューラルネットワークを複数のプロセッサを用いた並列処理により実現する場合においても, 基本的にはこの二つの様式が利用可能である. すなわち, 個々のニューロンは本来それぞれが独立して処理を行うものであるという考え方に立てば, 各プロセッサが複数のニューロンの処理を独立して行う並列接続を採用するというのがそのひとつである. また, 入力側から出力側に向かってニューロンの出力値により表現される情報が処理を施されながら伝達されてゆくという考え方に立てば, 直列接続を採用することになる. Hopfield モデル[37][38]に代表される相互結合型のニューラルネットワークではニューロンによる入力側/出力側という区別が明確でなく各々のニューロンは独立にふるまうため並列接続による処理が考えられ, 階層型のニューラルネットワークの場合には処理が入力層から出力層へと行われるため各層を一つの処理単位と見なす直列接続による処理が考えられる.

A.9.2 モジュール化構成に基づく処理の分割

第 4章で提案した動作誘導手法で用いるニューラルネットワークは比較的小規模のネットワークのモジュール (ネットワークモジュール) を組み合わせることにより全体を構成している (4.3節). この点に着目し, ネットワークモジュール単位でプロセッサを割り当てることにより全体の処理システムを構成することを考える. 図 4.5に示した構成のネットワーク NNK の場合であれば, 各々のネットワークモジュール TM にプロセッサを割り当て, その構成に従い各プロセッサを接続すればよい. この場合の



(a) ベース節点位置$\boldsymbol{X}_B$と部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$を入力に持つ場合



(b) ベース節点位置$\boldsymbol{X}_B$, 部材長ベクトル$\boldsymbol{L}$に加えて節点位置$\boldsymbol{X}$を入力に持つ場合

図 A.6: ネットワーク NNK(図 4.5) の並列処理プロセッサによる実現

プロセッサの配置を図 A.6(a) に示す. このような構成により, 各ネットワークモジュールのニューロンの数が同程度であれば各々のプロセッサに割り当てられるニューロンの数も同程度となるため, 全体としての処理効率を維持することができる. また, ネットワークモジュール相互の結合は比較的簡潔であるため, プロセッサ間通信によるオーバーヘッドを軽減することができる. しかしながらこの場合には, ベース側のトラスモジュール 1 に対応するネットワークモジュール TM^1から適応トラス先端のトラスモジュール Mに対応するネットワークモジュール TM^Mに向かって節点位置の情報が伝播されてゆくため, 多数の TM を接続した場合には情報の時間遅れが問題となる.

適応トラスの全ての節点位置をセンサ等により知ることができる場合には, 図 A.6(b) に示す構成も可能である. この場合にはネットワークモジュール TM^nの入力$\boldsymbol{X}_{n-3}$, $\boldsymbol{X}_{n-2}$, $\boldsymbol{X}_{n-1}$はそれらのセンサに接続され, 前述の図 A.6(a) に示す構成の場合に問題となった情報の時間遅れは解消される. また, 各 TM の間の依存関係も存在しないため, 処理の分散化という観点からはこちらの方が適している.

同様にして動作評価規範に対応するニューラルネットワーク NNC の処理を行う並列処理システムを構成し, NNK の処理を行うシステムと接続することにより, 図 4.4に示した適応トラスの動作誘導ネットワーク NNKC の処理を行う並列処理システムを構成することができる.

参考文献

1. Shaheen Ahmad and Shengwu Luo, "Coordinated Motion Control of Multiple Robotic Devices for Welding and Redundancy Coordination through Constrained Optimization in Cartesian Space", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.4, 1989, pp.409-417.

2. 相澤 益男, "機械工学に望むもの (生物学の視点から)", 日本機械学会誌, 第 90 巻, 第 823 号, 1987, pp.776-777.

3. 秋山 浩二, 瀧本 昭雄, 小川 久仁, "光ニューロン素子", 電子情報通信学会誌, Vol.75, No.8, 1992, pp.831-834.

4. 浅川 和雄, "ニューロコンピュータ", 精密工学会誌, 第 54 巻 第 6 号, 1988, pp.1048-1052.

5. 浅野 都司, "多関節メカニズムと制御", 精密工学会誌, 第 54 巻 第 5 号, 1988, pp.833-837.

6. 麻生 英樹, ニューラルネットワーク情報処理 (コネクショニズム入門, あるいは柔らかな記号に向けて), 1989, 産業図書.

7. 東 昭, 生物・その素晴しい動き, 1986, 共立出版.

8. Can M. Baycan, Senol Utku and Ben K. Wada, "Control of Resonant Frequencies in Adaptive Structures by Prestressing", Second

Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures (Yuji Matsuzaki and Ben K. Wada eds.), 1991, pp.297-314, Technomic Publishing.

9. John Baillieul, "Avoiding Obstacles and Resolving Kinematic Redundancy", Proceedings of IEEE 1986 International Conference on Robotics and Automation, 1986, pp.1698-1704.

10. John Baillieul, "A Constraint Oriented Approach to Inverese Problems for Kinematically Redundant Manipulators", Proceedings of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987, pp.1827-1833.

11. Daniel R. Baker and Charles W. Wampler II, "On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol.7, No.2, 1988, pp.3-21.

12. Karel Čapek, R. U. R. — Rossum's Universal Robots —, 1921, (千野 栄一訳「ロボット」, 1989, 岩波文庫).

13. Pyung H. Chang, "A Closed-Form Solution for the Control of Manipulators with Kinematic Redundancy", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volume 1, 1986, pp.9-14.

14. Gun-Shing Chen and Ben K. Wada, "On an Adaptive Truss Manipulator Space Crane Concept", First Joint U.S./Japan Conference on Adaptive Structures (Ben K. Wada, James L. Fanson and Koryo Miura eds.), 1990, pp.726-742, Technomic Publishing.

15. Gregory S. Chirikjian and Joel W. Burdick, "Applications of Hyper-Redundant Manipulators for Space Robotics and Automation", Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 1990, pp.291-294.

16. S. K. Das, S. Utku and B. K. Wada, "Inverse Dynamics of Adaptive Structures Used as Space Cranes", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 1, No.1, 1990, pp.50-75.

17. P. Dauchez, P. Coiffet and A. Fournier, "Cooperation of Manipulators in Assembly Tasks", Digital Systems for Industrial Automation, Volume 2, Number 2, 1984, pp.179-200, Crane, Russak & Company.

18. Pierre Dauchez, Alain Fournier and René Jourdan, "Hybrid Control of a Two Arm Robot: The Relative Motion Problem", Robotics and Manufacturing (Recent Trends in Research, Education and Applications) (M. Jamshidi, Y. Y. S. Luh, H. Seraji and G. P. Starr eds.), 1988, pp.361-370, ASME Press.

19. Gabriele M. T. D'Eleuterio and G. B. Sincarsin, "Articulational Dynamics of Variable-Geometry Truss Structures", Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures (Yuji Matsuzaki and Ben K. Wada eds.), 1991, pp.621-638, Technomic Publishing.

20. M. G. Forrest-Barlach and Scott M. Babcock, "Inverse Dynamics Position Control of a Compliant Manipulator", IEEE Journal of Robotics and Automation Vol.RA-3, No.1, 1987, pp.75-83.

21. 藤本 憲司, 田所 諭, 高森 年, 村尾 良夫, "6 自由度ダイレクト駆動関節の開発 (第 1 報, 関節機構の構成とモデリング)", 第 6 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1989, pp.237-240.

22. Toshio Fukuda and Seiya Nakagawa, "Approach to the Dynamically Reconfigurable Robotic System", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.1, 1988, pp.55-72.

23. 福田 敏男, "柔軟構造のメカニズムと制御", 精密工学会誌, 第 54 巻第 5 号, 1988, pp.838-842.

24. 舟橋 宏明, 堀江 三喜男, 久保田 哲也, 武田 行生, "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 巻 523 号, 1990, pp.829-834.

25. 舟橋 宏明, 武田 行生, 吉野 太容, 堀江 三喜男, "ユニット構成のロボットにおける制御系構成と情報管理", 日本機械学会論文集 (C 編) 57 巻 540 号, 1991, pp.2758-2763.

26. Ken-ichi Funahashi, "On the Approximate Realization of Continuous Mapping by Neural Networks", Neural Networks, vol.2, no.3, 1989, pp.183-192.

27. Ashitava Ghosal and Bernard Roth, "A New Approach for Kinematic Resolution of Redundancy", The International Journal of Robotics Research, Vol.7, No.2, 1989, pp.22-35.

28. William H. Greene, "Effects of Random Member Length Errors on the Accuracy and Internal Loads of Truss Antennas", Journal of Spacecraft, Vol.22, No.5, 1985, pp.554-559.

29. 萩原 将文, "淘汰機能を有するバックプロパゲーション (学習回数の低減と中間層ユニットの削減法)", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-II, No.6, 1991, pp.812-818.

30. 半谷 裕彦, 川口 健一, 形態解析 (一般逆行列とその応用), 1991, 培風館.

31. Atsuko Hara and Koichi Sugimoto, "Micromanipulator with Multi-Degrees of Freedom", Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, 1989, pp.505-512.

32. 林 国一, 機構学, 1984, 朝倉書店.

33. Akira Hayashi and Benjamin Kuipers, "A Continuous Approach to Robot Motion Planning with Many Degrees of Freedom", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.1935-1942.

34. Geoffrey Hinton, "Parallel Computations for Controllig an Arm", Journal of Motor Behavior, Vol.16, No.2, 1984, pp.171-194.

35. 広瀬 茂男, 生物機械工学–柔らかいロボットの基本原理と応用–, 1987, 工業調査会.

36. Shigeo Hirose, Kiyosi Yokoshima and Shugen MA, "2 DOF Moray Drive for Hyper Redundant Manipulator", Proceedings of the IEEE/International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.1735-1740B.

37. J. J. Hopfield, "Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities", Proceedings of the National Academy of Science USA, Vol.79, No.8, 1982, pp.2554-2558.

38. J. J. Hopfield, "Neurons with Graded Response Have Collective Computational Properties Like Those of Two-State Neurons", Proceedings of the National Academy of Science USA, Vol.81, No.10, 1984, pp.3088-3092.

39. P. C. Hughes, W. G. Sincarsin and K. A. Carroll, "Trussarm – A Variable-Geometry-Truss Manipulator", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 2, No.2, 1991, pp.148-160.

40. 池田, 高野, 中川, "ロボットアームの加減速制御法と実験結果", 第2回フレキシブル・オートメーション・シンポジウム講演論文集, 1985, pp.37-39.

41. 岩田 , "VLSI とニューロコンピュータ", 電気学会雑誌, 112 巻 7 号, 1992, pp.495-502.

42. "特集「工場から出るロボット」", 日本機械学会誌, 第 93 巻, 第 865 号, 1990.

43. "ワークショップ: 感性は技術になりうるか (設計における定性的関係の処理)", 日本機械学会第 69 期全国大会講演会資料集, Vol.D, 1991, pp.173-201.

44. 精密工学会, 講習会「ニューロコンピュータとは何か」テキスト, 1989.

45. "特集「やわらかい機械」", 精密工学会誌, 第 57 巻 第 12 号, 1991.

46. "座談会: やわらかい機械をめざして (メカトロニクスの今後)", 精密工学会誌, 第 57 巻 第 12 号, 1991, pp.14-24.

47. 笠原 博徳, "並列処理技術 (並列処理技術の概要)", シミュレーション, 1989, pp.30-38.

48. 川人 光男, "計算論的神経科学", 日本 ME 学会誌, Vol.3, No.10, 1989, pp.18-26.

49. Kazem Kazerounian and Zhaoyu Wang, "Global versus Local Optimization in Redundancy Resolution of Robotic Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol.7, No.5, 1988, pp.3-12.

50. Manja Kirćanski and Miomir Vukobratović, "Contribution to Control of Redundant Robotic Manipulators in an Environment with Obstacles", The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.4, 1986, pp.112-119.

51. Charles A. Klein and Bruce E. Blaho, "Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.2, 1987, pp.72-83.

52. Charles A. Klein and Koh-Boon Kee, "The Nature of Drift in Pseudoinverse Control of Kinematically Redundant Manipulators",

IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.2, 1989, pp.231-235.

53. H. Kobayashgi, E. Shimemura and K. Suzuki, "A Distributed Control for Hyper Redundant Manipulator", Proceedings of the IEEE/R International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.1958-1963.

54. 小鍛冶 繁, "超多自由度ロボット", ロボティクス部門ニュースレター Robotics & Mechatronics, No.6, 1990, pp.3-4, 日本機械学会ロボティクス部門.

55. S. Kokaji, "A Fractal Mechanism and Decentraized Control Method" Proceedings of the USA-Japan Symposium on Flexible Automation, Volume II, 1989, pp.1129-1134.

56. 小鍛冶 繁, 村田 智, 黒川 治久, 鈴木 章夫, "やわらかい機械におけるモジュール化, 自己組織化", 精密工学会誌, 第57巻 第12号, 1991, pp.33-36.

57. Theodore Kokkinis and Jeffrey Dale Wilson, "Design of Continuous Robotic Arms", Robotics and Manufacturing (Recent Trends in Research, Education and Applications) (M. Jamshidi, Y. Y. S. Luh, H. Seraji and G. P. Starr eds.), 1988, pp.301-308, ASME Press.

58. Juhani Koski, "Defectiveness of Weighting Method in Multicriterion Optimization of Structures", Communications in Applied Numerical Methods, Vol.1, 1985, pp.333-337, John Wiley & Sons.

59. 久保田 競, "神経ネットワークの形成について", 精密工学会誌, 第55巻 第4号, 1989, pp.12-14.

60. A. Kumar and K. J. Waldron, "The Workspace of a Mechanical Manipulator", Journal of Mechanical Design, Vol.103, 1981, pp.665-672.

61. Sun-Yuan Kung and Jenq-Neng Hwang, "Neural Network Architectures for Robotic Applications", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.5, 1989, pp.641-657.

62. Fumihiro Kuwao, Gun-Shing Chen and Ben K. Wada, "Quasi-Static Shape Estimation and Control of Adaptive Truss Structures Using Internal Displacement Sensors", Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures (Yuji Matsuzaki and Ben K. Wada eds.), 1991, pp.375-392, Technomic Publishing.

63. T. W. Lee and D. C. H. Yang, "On the Evaluation of Manipulator Workspace", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.105, 1983, pp.70-77.

64. Kok-Meng Lee and Dharmen K. Shah, "Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator", Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987, pp.345-350.

65. Sukhan Lee, "Dual Redundant Arm Configuration Optimization with Task-Oriented Dual Arm Manipulability", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.1, 1989, pp.78-97.

66. Anthony A. Maciejewski, "Kinetic Limitations on the Use of Redundancy in Robotic Manipulators", IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol.7, No.2, 1991, pp.205-210.

67. D. P. Martin, J. Baillieul and J. M. Hollerbach, "Resolution of Kinematic Redundancy Using Optimization Techniques", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.4, 1989, pp.529-533.

68. 松永 豊, 中出 美彰, 山川 修, 村瀬 一之, "階層形ニューラルネットワークの中間層素子を自動削減する誤差逆伝搬学習アルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-II, No.8, 1991, pp.1118-1121.

69. J. P. Merlet, "Parallel Manipulator: Kinematics, Singular Configurations and Compliance", Towards Third Generation Robotics: Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Robotics, 1987, pp.125-135, IFS/Springer-Verlag.

70. Koryo Miura, "Variable Geometry Truss Concept (Part I: Design and Operation of a Deployable Truss Structure. Part II: Review on Special Applications of Variable Geometry Truss)", The Institute of Space and Astronautical Science Report No.614, 1984.

71. Koryo Miura and Hiroshi Furuya, "An Adaptive Structure Concept for Future Space Applications", Proceedings of 36th Congress of the International Astronautical Federation, 1985.

72. Koryo Miura, "Space Structures and Applied Mechanics (Morphology in Space)", Theoretical and Applied Mechanics, Volume 37,

1987, pp.227-234, University of Tokyo Press.

73. Hiroyuki Miyamoto, Mitsuo Kawato, Tohru Setoyama and Ryoji Suzuki, "Feedback-Error-Learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator", Neural Networks, Vol.1, 1988, pp.251-165.

74. 三好 俊郎, "有限要素法によるロボットの動力学解析", 精密工学会誌, 第 51 巻 第 11 号, 1985, pp.26-33.

75. Yoshisada Murotsu and Shaowen Shao, "Optimum Adaptation of Intelligent Truss Structures", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 1, No.2, 1990, pp.175-188.

76. 室津 義定, 大久保 博志, 泉田 啓, 久司 一博, "知的適応構造物の制御 (第 1 報, 最適軌道制御)", 日本機械学会論文集 (C 編) 57 巻 543 号, 1991, pp.3518-3525.

77. 室津 義定, 大久保 博志, 泉田 啓, 野口 豊文, "知的適応構造物の制御 (第 2 報, 最適軌道制御実験)", 日本機械学会論文集 (C 編) 58 巻 551 号, 1992, pp.2395-2402.

78. Frank Naccarato and Peter Hughes, "Redundancy Resolution in Variable-Geometry Truss Manipulators Using Reference Shape Curv Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures (Yuji Matsuzaki and Ben K. Wada eds.), 1991, pp.539-555, Technomic Publishing.

79. 長松 昭男, 斉藤 俊, 一柳 高畤, "ロボットのシミュレーションに関する研究 (第 1 報, 位置, 速度および加速度の数値解析)", 日本機械

学会論文集 (C 編) 51 巻 470 号, 1985, pp.2668-2676.

80. 長松 昭男, 斉藤 俊, 一柳 高畤, "ロボットのシミュレーションに関する研究 (第 2 報, 力の数値解析)", 日本機械学会論文集 (C 編) 51 巻 470 号, 1985, pp.2677-2683.

81. 長松 昭男, 斉藤 俊, 一柳 高畤, "ロボットのシミュレーションに関する研究 (第 3 報, 振動解析, その 1)", 日本機械学会論文集 (C 編) 51 巻 470 号, 1985, pp.2684-2690.

82. 長田 正, "機械の知能化の動向", 日本機械学会誌, 第 89 巻, 第 815 号, 1986, pp.1123-1128.

83. Shigeru Nakagiri, "Fluctuation of Structural Response, Why and How", JSME International Journal, Volume 30, No.261, 1987, pp.369 374.

84. 中村 仁彦, 花房 秀郎, "関節形ロボットアームの最適冗長性制御 (拘束条件付軌道計画問題の最適解法)", 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.5, 1985, pp.501-507.

85. Yoshihiko Nakamura, Hideo Hanafusa and Tsuneo Yoshikawa, "Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.2, 1987, pp.3-15.

86. 中村 宏, 堀川 武, "機械の寿命の研究からみたヒューマンサイエンス", 日本機械学会関西支部第 219 回講演会講演論文集, No.901-4, 1990, pp.231-233.

87. M. Natori and K. Miura, "Deployable Structures for Space Applications", Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1985.

88. 名取 通弘, "宇宙構造物工学の概要", 土木学会論文集, 第 410 号/I-12, 1989, pp.1-16.

89. Charles C. Nguyen and Farhad J. Pooran, "Kinematics and Dynamics of a Six-Degree-of-Freedom Robot Manipulator with Closed Kinematic Chain Mechanism", Robotics and Manufacturing (Recent Trends in Research, Education and Applications) (M. Jamshidi, J. Y. S. Luh, H. Seraji and G. P. Starr eds.), 1988, pp.351-359, ASME Press.

90. "極限作業ロボット開発に意欲", 日刊工業新聞, 昭和 60 年 9 月 11 日, 1985.

91. "胃カメラを形状記憶合金で制御: 胃腸内部の形状に従って円滑に作動", 日系メカニカル, No.184, 1985, pp.29.

92. "宇宙用トラス構造の研究始まる: 畳んで打ち上げ空間で伸展", 日経メカニカル, No.185, 1985, pp.97-103.

93. "誘導治具なしで自走するロボット: 建設現場の無人化を加速", 日経メカニカル, No.190, 1985, pp.83-88.

94. "静止軌道に咲くアンテナ: 折り畳み機構を工夫", 日経メカニカル, No.275, 1988, pp.70.

95. "通信衛生の巨大展開アンテナ: 正四面体の単位を組み合わせる. ", 日経メカニカル, No.275, 1988, pp.80-82.

96. 小野田 淳次朗, “展開トラスとその宇宙構造物への応用”, 第 28 回宇宙科学技術連合講演会講演論文集, 1984, pp.426-427.

97. 小野田 淳次朗, R. T. Haftka, “柔軟宇宙飛翔体の構造/制御系の同時最適化”, 第 28 回構造強度に関する講演会講演論文集, 1986, pp.80-83.

98. B. John Oommen, Ncte Andrade and S. Sitharam Iyengar, “Trajectory Planning of Robot Manipulators in Noisy Work Spaces Using Stochastic Automata”, The International Journal of Robotics Research, Vol.10, No.2, 1991, pp.135-148.

99. Dinesh K. Pai and M. C. Leu, “Uncertainty and Compliance of Robot Manipulators with Applications to Task Feasibility”, The International Journal of Robotics Research, Vol.10, No.3, 1991, pp.200-213.

100. Shantaram S. Pai and Christos C. Chamis, “Probabilistic Structural Analysis of Adaptive/Smart/Intelligent Space Structures”, Second Joint Japan/U.S. Conference on Adaptive Structures (Yuji Matsuzaki and Ben K. Wada eds.), 1991, pp.419-433, Technomic Publishing.

101. R. P. Paul, Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, 1981, The MIT Press.

102. シェムニスキー, J. S. (山田, 川井 訳) , マトリクス構造解析の基礎理論, 1971, 培風館.

103. A. V. Ramesh, S. Utku, B. K. Wada and G. S. Chen, “Effect of Imperfections on Static Control of Adaptive Structure as a Space Crane”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 1, No.3, 1990, pp.309-326.

104. Einar Ramsli, “Probability Distribution of Repeatability of Industrial Robots”, The International Journal of Robotics Research, Vol.10, No.3, 1991, pp.276-283.

105. ラオ, C. R., ミトラ, S. K. (渋谷 政昭, 田辺 国士 訳), 一般逆行列とその応用, 1973, 東京図書.

106. ラオ, C. R. (奥野ほか訳), 統計的推測とその応用, 1977, 東京図書.

107. S. S. Rao and S. K. Hati, “Game Theory Approach in Multicriteria Optimization of Function Generating Mechaisms”, Journal of Mechanical Design, Vol.101, No.3, 1979, pp.398-406.

108. Dan Reznik and Vladimir Lumelsky, “Motion Planning with Uncertainty for Highly Redundant Kinematic Structures (I. “Free Snake” Motion)”, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992, pp.1747-1752.

109. D. E. ラメルハート, J. L. マクレランド, PDP リサーチグループ (甘利 俊一監訳), PDP モデル (認知科学とニューロン回路網の探索), 1989, 産業図書.

110. 坂和 正敏, 線形システムの最適化 (一目的から多目的へ), 1984, 森北出版.

111. 佐藤 武, 山崎 信寿, “生体の機械力学入門”, 日本機械学会誌, 第 89 巻, 第 810 号, 1986, pp.493-498.

112. L. Sciavicco and B. Siciliano, “An Inverse Kinematic Solution Algorithm for Dexterous Redundant Manipulators”, Towards Third Generation Robotics: Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Robotics, 1987, pp.247-256, IFS/Springer-Verlag.

113. Yasuyuki Seguchi, Masao Tanaka, Yukihiro Sasabe, Hideo Tsuji and Koichi Ohmura, “Evolution of Mast-Type Truss to Robot Arm” Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation, 1986, pp.251-259.

114. 瀬口 靖幸, 田中 正夫, 山口 智久, 笹部 幸博, 辻 英男, “立体静定トラス形高多自由度アームの運動と振動”, 日本機械学会論文集 (C 編) 54 巻 503 号, 1989, pp.1411-1418.

115. 瀬口 靖幸, “形態と機能: 構造設計の立場から”, 精密工学会誌, 第 56 巻 第 6 号, 1990, pp.973-978.

116. Yasuyuki Seguchi, Masao Tanaka, Tomohisa Yamaguchi, Yukihiro Sasabe and Hideo Tsuji, “Dynamic Analysis of a Truss-Type Flexible Robot Arm”, JSME International Journal Series III, Volume 33, No.2, 1990, pp.183-190.

117. Homayoun Seraji, “Configuration Control of Redundant Manipulators: Theory and Implementation”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.4, 1989, pp.472-491.

118. T. Shamir, “The Singularityies of Redundant Robot Arms”, The International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.1, 1990, pp.11 121.

119. 清水 信行, “動的問題のシミュレーション (時間積分法について)”, 日本機械学会誌, 第 92 巻, 第 847 号, 1989, pp.514-519.

120. 清水 誠也, 嘉数 侑昇, “Hopfield 型ニューラルネットのロボットマニピュレータへの応用 (冗長自由度マニピュレータの干渉回避軌道の生成)”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 1989, pp.907-908.

121. D. Stewart, “A Platform with Six Degrees of Freedom”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.180, Part 1, No.15, 1965-66, pp.371-386.

122. Koichi Sugimoto, “Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means of Motor Algebra”, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.109, 1987, pp.3-9.

123. 鈴木 良次, “動物の行動制御のメカニズム”, 日本機械学会第 666 回講習会教材, 1988, pp.65-71.

124. 鈴木 良次, 川人 光男, 宇野 洋二, “人間の手の技能はどのようにして獲得されるか (ニューラルネットワークの運動制御への応用)”, 日本バイオメカニズム学会誌, Vol.2, No.10, 1988, pp.676-682.

125. Masao Tanaka, Yasuyuki Seguchi and Tomohisa Yamaguchi, “On the Motion Planning of Truss-Type Arm of High Degrees of Free-

dom", Proceedings of the USA-Japan Symposium on Flexible Automation, 1988, pp.279-286.

126. 田中 健一, 堤 一義, "運動系ニューラルネットワークとロボット制御", システム/制御/情報, Vol.36, No.10, 1992, pp.653-660.

127. M. H. Thursby, B. G. Grossman and F. Ham, "Artificial Neural Processors for Control of Smart Sources", Adaptive Structures, AD-Vol.15 (B. K. Wada eds.), 1989, pp.77-82, ASME Press.

128. Paul H. Tidwell, Charles F. Reinholtz, Harry H. Robertshaw and C. Garnett Horner, "Kinematic Analysis of Generalized Adaptive Trusses", First Joint U.S./Japan Conference on Adaptive Structures (Ben K. Wada, James L. Fanson and Koryo Miura eds.), 1990, pp.772-791, Technomic Publishing.

129. 戸川 達男, "生物システム構築の素材の特徴", システム/制御/情報, Vol.36, No.4, 1992, pp.215-219.

130. Vassilios D. Tourassis and Marcelo H. Ang, Jr., "A Modular Architecture for Inverse Robot Kinematics", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.5, 1989, pp.555-569.

131. Transputing'91: Proceedings of the World Transputer User Group Conference (Peter Welch, Dyke Stiles, Tosiyasu L. Kunii and André Bakkers eds.), 1991, IOS Press.

132. Y. C. Tsai and A. H. Soni, "Accessible region and Synthesis of Robot Arms", Journal of Mechanical Design, Vol.103, 1981, pp.803-811.

133. Y. C. Tsai and A. H. Soni, "An Algorithm for the Workspace of a General n-R Robot", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.105, 1983, pp.52-57.

134. Kazuyoshi Tsutsumi and Haruya Matsumoto, "Neural Computation and Learning Strategy for Manipulator Position Control", Proceedings of the IEEE First Annual International Conference on Neural Networks, 1987, pp.525-534.

135. Kazuyoshi Tsutsumi, Koichi Katayama and Haruya Matsumoto, "Neural Computation for Controlling the Configuration of 2-Diment Truss Structure", Proceedings of the IEEE Annual International Conference on Neural Networks, Vol.II, 1988, pp.575-586.

136. P. B. Usoro, R. Nadira and S. S. Mahil, "A Finite Element/Lagrange Approach to Modeling Lightweight Flexible Manipulators", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.108, 1986, pp.198-205.

137. 臼井 支朗, "細胞膜生理と神経回路", 計測と制御, Vol.25, No.2, 1986, pp.5-10.

138. S. Utku, A. V. Ramesh, S. K. Das, B. K. Wada and G. S. Chen, "Control of a Slow Moving Space Crane as an Adaptive Structure", Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1989, pp.1-8.

139. Kimon P. Valavanis and George N. Saridis, "Probabilistic Modeling of Intelligent Robotic Systems", IEEE Transactions on Robotics

and Automation, Vol.7, No.1, 1991, pp.164-171.

140. B. K. Wada, J. L. Fason and E. F. Crawley, "Adaptive Structures", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 1, No.2, 1990, pp.157-174.

141. Charles W. Wampler, II, "Inverse Kinematic Function for Redundant Spherical Wrists", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.1, 89, pp.106-111.

142. 山本 和夫, "宇宙用大型トラス構造の動力学シミュレーション", 第38回応用力学連合講演会講演論文集, 1989, pp.281-284.

143. D. C. H. Yang and T. W. Lee, "On the Workspace of Mechanical Manipulators", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.105, 1983, pp.62-69.

144. D. C. H. Yang and T. W. Lee, "Feasibility Study of a Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.106, 1984, pp.191-198.

145. Kazuhito Yokoi, Kiyoshi Komoriya and Kazuo Tanie, "A Method for Solving Inverse Kinematics of Variable Structure Truss Arm with High Redundancy", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 3, No.4, 1992, pp.631-645.

146. 吉田 利信, "打切り型ニュートン法を用いた多層神経回路網の学習法の検討", 電子情報通信学会, 技術研究報告, NC90-13, 1990, pp.1-5.

147. 吉田 利信, "2次元探索共役勾配法を用いた多層神経回路網の高速学習法", 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.7, 1990, pp.988-995.

148. Tsuneo Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms", The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No.2, 1985, pp.3-9.

149. 吉川 恒夫, "ロボットアームの動的可操作性", 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.9, 1985, pp.970-975.

150. V. B. Zamanov and Z. M. Sotirov, "Duality in Mechanical Properties of Sequential and Parallel Manipulators", Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, 1989, pp.1041-1050.

関連論文

学術論文誌

1. 田中 正夫, 瀬口 靖幸, 花原 和之, 山口 智久, 野田 将之, 藤田 雅成, “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 巻 519 号, 1989, pp.2754-2762.

2. 田中 正夫, 花原 和之, 瀬口靖幸, “モジュール形ニューラルネットワークモデルによるトラス形高冗長並列アームの姿勢制御”, 日本機械学会論文集 (C 編) 57 巻 533 号, 1991, pp.189-195.

   (同上英文) Masao Tanaka, Kazuyuki Hanahara and Yasuyuki Seguch “Configuration Control of the Truss-Type Parallel Manipulator by the Modular Neural Network Model”, Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series III, Volume 35, No.1, 1992, pp.89-95.

3. Masao Tanaka, Yasuyuki Seguchi and Kazuyuki Hanahara, “Kinematics of Adaptive Truss Permitting Nodal Offset (Configuration and Workspace Reach)”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 2, No.3, 1991, pp.301-327.

4. 田中 正夫, 花原 和之, “適応トラスの動作規範獲得 (モジュール形ニューラルネットによる実現)”, 日本機械学会論文集 (C 編) 58 巻 550 号, 1992, pp.1735-1741.

5. Masao Tanaka and Kazuyuki Hanahara, "Stochastic Approach to Static Control of Adaptive Truss Under Imperfection of Adjustable Member Lengths", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Volume 3, No.4, 1992, pp.617-630.

国際会議論文集

1. Masao Tanaka, Yasuyuki Seguchi and Kazuyuki Hanahara, "An Experimental Study of a Truss-Type Parallel Manipulator", Proceedings of 20th International Symposium on Industrial Robots, 1989, pp.521-528.

2. Masao Tanaka, Yasuyuki Seguchi and Kazuyuki Hanahara, "Motion/Configuration Control of Truss-Type Parallel Manipulator with High Redundancy (A New Approach by Modular Neural Network)", Proceedings of Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Volume I, 1990, pp.329-336, ISCIE.

3. Kazuyuki Hanahara, Masao Tanaka and Yasuyuki Seguchi, "Modular Neural Networks for Motion Control of the Truss-Type Redundant Robot Arm", Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 1990, pp.153-156.

4. Yasuyuki Seguchi, Masao Tanaka and Kazuyuki Hanahara, "Criteria Oriented Configuration Control of Adaptive Structure and Its Modular Neural Network Representation", First Joint U.S./Japan Conference on Adaptive Structures (Ben K. Wada, James L. Fanson and Koryo Miura eds.), 1990, pp.402-421, Technomic Publishing.

5. Kazuyuki Hanahara, Masao Tanaka and Yasuyuki Seguchi, "Statistical Motion Control of Truss-Type Mechanism with Large Number of Inaccurate Actuators", Computational Mechanics '91 Theory and Applications (S. N. Atluri, D. E. Beskos, R. Jones and G. Yagawa eds.), 1991, pp.346-351, ICES Publications.

6. Masao Tanaka and Kazuyuki Hanahara, "Motion Planning of Truss-Type Robot: Acquisition and Representation of Criterion by Modular Neural Network", Proceedings of IEEE/RSJ International Work shop on Intelligent Robots and Systems'91 Volume 2, 1991, pp.829-834, IEEE.

7. Kazuyuki Hanahara and Masao Tanaka, "Dynamic Simulation of Truss-Type Flexible Redundant Parallel Mechanism Permitting Nod Offset", Proceedings of the Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Volume 1, 1992, pp.143-146, ASME.

8. Masao Tanaka and Kazuyuki Hanahara, "Adaptive Design System for Intelligent Structure by Modular Neural Network", Proceedings of the Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Volume 1, 1992, pp.227-230, ASME.

9. Masao Tanaka and Kazuyuki Hanahara, "Simulation Study of Dynamic Properties and Nodal Offset of Truss-Type Parallel Mechanism", Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems '92 Volume I, 1992, pp.445-450.

10. Masao Tanaka and Kazuyuki Hanahara, "Adaptive Design Capability for Intelligent Truss by Neural Network", First International Conference on Adaptive Structures, 1992, in press.

謝辞

本研究は, 故人となられた元大阪大学基礎工学部瀬口靖幸教授の下で始められた. 先生が示された研究に対する熱意, 与えて下さったご助言の数々は, 研究を進めてゆく上での大きな支えであった. 深く感謝するとともに, 心よりご冥福をお祈りする.

本論文をまとめるにあたり, 大阪大学基礎工学部宮崎文夫教授からご指導, ご鞭撻を, 大阪大学基礎工学部福岡秀和教授, 小坂田宏造教授からは数々のご指摘を賜った. ここに厚く御礼申し上げる.

本研究を進めてゆく上で大阪大学基礎工学部田中正夫助教授には終始懇切丁寧なる直接のご指導を受けた. また, 大阪大学基礎工学部森本吉春助教授には有益なご討論を頂戴した. 深く感謝の意を表す. 共同研究者であった藤田雅成君 (現在, 株式会社ダイヘン), 岡崎浩史君 (現在, 株式会社豊田自動織機製作所), 新美直樹君 (現在, 大阪大学大学院) には, システム試作などの協力を戴いた. また, 平俊男君, 岡田健一君をはじめとする旧瀬口研究室, 田中研究室の諸氏にはさまざまな面でお世話になった. 記して感謝する.