

トラス型ロボット機構におけるひずみエネルギー抑制のための姿勢決定

Attitude Determination for Restraining Strain Energy in Truss-Type Robotic Architecture

○ 石井悠一郎 (筑波大院) 正 磯部大吾郎 (筑波大)

In this paper, attitude determination analysis for restraining strain energy in a truss-type robotic architecture is carried out by the Finite Element Method (FEM). In structural engineering, FEM is generally used to obtain distribution of sectional force or strain that occur in structures, and to estimate their elasto-plastic behavior. This research is done with the aim of preventing large deformation and destruction of constituting members in a robotic architecture while it is at work, and of realizing robotic task in structurally safer attitude.

**Key Words:** Finite Element Method (FEM), Attitude Determination, Strain Energy

1. 緒言

我々人間を初めとした全ての動物は、生まれ持った肉体を最大限に利用するために、意識的あるいは無意識的に最適な姿勢をとろうとする。すなわち、肉体に同一の作業を要求したとしても、姿勢によっては腰や足などを痛めてしまうため、目的とする作業を実現し、なおかつ肉体的負担が最も軽減された姿勢をとろうとするのである。ロボットの場合も同様に、無理な姿勢での作業は構成材料の変形や破断などの機構的に危険な状態を招く。したがって、ロボットの作業姿勢を「与えられた機構を最大限に利用し、かつ負担を最小にして作業を行う」という観点から決定することは非常に有用であろう。本研究では、このような発想が根底に存在する。

現在のロボット工学では、このような理念の下での研究はあまり見られず、設定された目標軌道上の作業に対して機構的危険性が生じるならば、それが生じる個所を補強するなど設計段階で改良を加えることが多い。この概念は、目的が限られた動作には有効であるが、多目的の動作を行うロボットには必ずしも適さない。

本研究では、機構内に蓄積される全ひずみエネルギーを機構の負担を示す値として用い、図1のようなトラス型ロボット機構に働く静的外力に対し、蓄積される全ひずみエネルギーを危険値よりも小さく抑えるような姿勢決定を行う。なお、機構が材料学的に降伏状態となるような全ひずみエネルギーの値を臨界ひずみエネルギーと呼び、これを危険値とする。解析アルゴリズムでは、全ひずみエネルギーを Shifted Integration 法 (SI 法) [1] を用いた有限要素法 (FEM) による解析で算出し、これを抑制するような姿勢を直接探索法で探索するという手法をとる。

FEM は、構造工学において一般的な解析手法で、構造内の応力状態などを計算することができる。これをロボット機構に適用することにより、部材変形を考慮した解析が可能となる。今回のようなひずみエネルギーを指標にした解析を容易

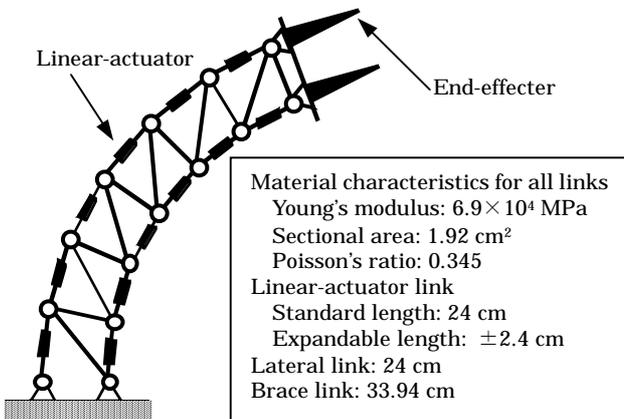


Fig. 1: Truss-type robotic architecture

に実現することができたのも、FEM を使用したからである。また FEM が、入力データを変更することによって様々なモデルへ柔軟に対処可能なアルゴリズムであることも、非常に有用な点である。

2. Shifted Integration 法 (SI 法)

SI 法とは、剛体間が回転・せん断ばねで連結された剛体ばねモデルと等価な状態を、あらかじめ数値積分点をシフトさせた線形チモシェンコはり要素で表現する手法である (図2参照)。その際、剛体ばねモデルのばね位置  $r$  と線形チモシェンコはり要素の数値積分点位置  $s$  の関係は、次式のように与えられる [1]。

$$s = -r \quad \text{または} \quad r = -s \quad (1)$$

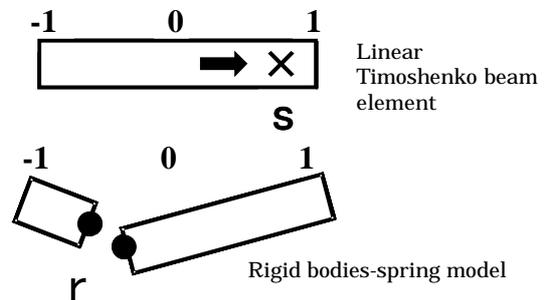


Fig. 2: Shifted Integration technique

図1のモデルに対しては、各部材が両端にばねを持つ剛体ばねモデルであると考えれば、1部材を部材中央に数値積分点をシフトした2つの線形チモシェンコはり要素で表現することができる。SI 法の特徴は、このような少ない要素分割数で十分に高い精度が得られることである。

また、断面力-ひずみマトリクスの軸剛性以外の対角項成分にかける係数として  $C_{mot}$  ( $0 \leq C_{mot} \leq 1$ ) を導入することで、部材関節の状態を変化させることができる。本研究で SI 法を用いたもう一つの理由は、 $C_{mot}$  の導入により、各節点が完全なピン状態の場合だけでなく、部材が曲げ変形やせん断変形を受ける場合への対応も可能と考えるからである。

$$C_{mot} = 0 \quad : \text{ピン状態}$$

$$C_{mot} = 1 \quad : \text{剛節状態}$$

ただし、本研究ではトラス構造を対象としているため、解析では  $C_{mot} = 0$  としている。

### 3. 直接探索法

直接探索法とは、1変数関数に対する極値を探索するための手法の一つである。例えば図3のような関数を考える。前ステップと現ステップとの関係が

$$f(x^{s-1}) > f(x^s) \quad (2)$$

であれば、 $s+1$ ステップ目への増分は

$$\Delta^{s+1} = \Delta^s \quad (3)$$

と置き換えて、

$$f(x^{s-1}) < f(x^s) \quad (4)$$

であれば、 $s+1$ ステップ目への増分は

$$\Delta^{s+1} = -\Delta^s/2 \quad (5)$$

を用いて、反復収束計算を行う。

全ひずみエネルギーに関わる変数は伸縮部材の数だけあるが、本研究では拘束部に近い伸縮部材から順にこの手法を適用し、全ひずみエネルギーを抑制する姿勢を求めた。ここで、拘束部に近い伸縮部材から順に直接探索法を適用したのは、このような部材ほど伸縮によって大きく全体の姿勢を変化させ、全ひずみエネルギーに対して大きな影響力を及ぼす場合が多いためである。

### 4. 臨界ひずみエネルギーの決定

構造物に外力を徐々に作用させると、その内部にはひずみエネルギーが蓄積される。このようにして蓄積される全ひずみエネルギーは外力のする仕事と共に増大し、ある時点を越えると構造内の部材が降伏してしまう。その時点での全ひずみエネルギーの値を臨界ひずみエネルギー  $U_c$  とする。図1のモデルの先端に水平荷重を加え、臨界ひずみエネルギーを算出したところ、 $U_c = 952.64 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。

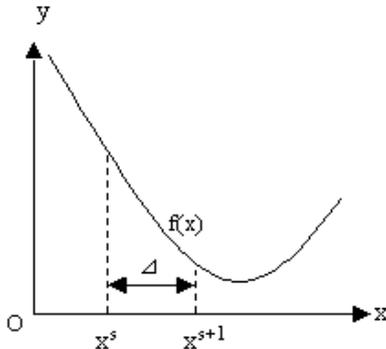


Fig.3: Direct search method

### 5. 全ひずみエネルギー抑制解析

図4の右側の形状をモデルの初期状態とし、先端節点に外力が作用するような場合の全ひずみエネルギー抑制解析を行ったところ、同図の左側のような姿勢が得られた。また、解析中における全ひずみエネルギーの推移を図5に示す。なお、図4の左側の形状および図5において、実線は臨界ひずみエネルギー  $U_c$  の90%、破線は80%まで全ひずみエネルギーを抑制させた場合の状態を示している。

図4は、全ひずみエネルギーを抑制しようとするほど必要な姿勢変化が大きくなり、やがては外力方向に沿うような姿勢へ近づいていくことを示している。実際には、リニアアクチュエータの可動範囲が限られているため姿勢変化には限界がある(ここでは、リニアアクチュエータの伸縮率を0.9~1.1倍として解析を行っている)が、図4から分かるように、根元付近の数本のリニアアクチュエータを伸縮させる

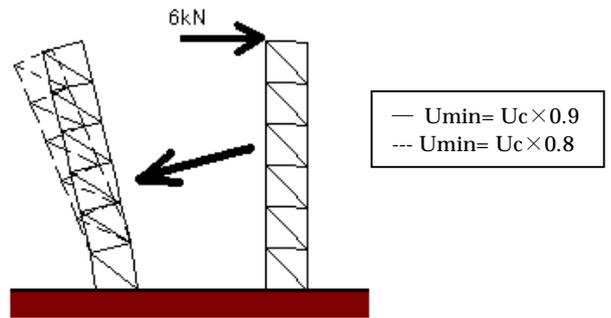


Fig.4: Transformation obtained from attitude determination analysis

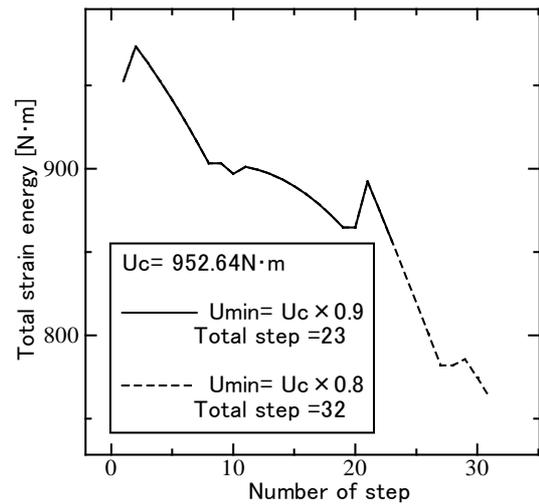


Fig.5: Transition of total strain energy during analysis

だけで、全ひずみエネルギーを安全値まで抑制することが可能である。

本解析においては、1ステップにつき約0.65秒の計算時間を必要とするため、30ステップでは約20秒(Intel Pentium 600MHz)もかかってしまう。このため、リアルタイム性には多少難がある。より短い計算時間での解析が可能になると思われる手法として数理計画法や最適化理論など[2][3]があるが、これらは数値的手法ではなく解析的手法であるため、本解析に適用するには全ひずみエネルギーの定式化が必要となる。しかしこの定式化は、全要素の変数を含むため困難を伴い、モデルが異なれば定式化し直す必要もあり、現実的とは言いがたい。今後、定式化せずとも速く収束解が得られるアルゴリズムの開発が必要である。

### 6. まとめ

トラス型ロボット機構に対して、先端に静的外力が作用する場合のFEMによる全ひずみエネルギー抑制解析を行い、ロボット機構の構造強度を重視した姿勢決定の可能性について検証した。

今後は、より高効率なアルゴリズムの開発、および荷物を高速で運搬する場合などの動的な運動に対する姿勢決定について検討していきたい。

### 参考文献

- [1] 都井裕: 骨組構造および回転対象シェル構造の有限要素解析における Shifted Integration 法について, 日本造船学会論文集, 第168号, pp.369-377, (1990).
- [2] 山川宏: 最適化デザイン, 倍風館, (1993).
- [3] 山本和夫: パソコンで学ぶ非線形機械力学シミュレーション, 日刊工業新聞社, (1996).