

ひずみエネルギーの抑制を目的としたロボット機構の姿勢決定および動作計画

Attitude Determination and Motion Planning of Robotic Architecture for Restraining Strain Energy

石井悠一郎¹⁾, 磯部大吾郎²⁾
 Yuichiro ISHII and Daigoro ISOBE

1)工修 三協フロンテア(株) (〒277-8539 千葉県柏市新十余二5番地)

2)工博 筑波大学助教授 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

This paper describes a new way of attitude determination and motion planning of robotic architecture by aiming restraint of total strain energy stored in the architecture. By using this scheme, a robotic architecture can avoid yielding of its constituting link members. In the motion planning, when the risk of member yielding becomes higher while the robot is in motion, a safer attitude for restraining its total strain energy is searched. At the next step, a new trajectory is created, beginning with the obtained attitude, and ends with the final target which is initially given. The procedure is repeated until a converged attitude is obtained. Risk for member yielding and total strain energy are calculated by Finite Element Method (FEM), and an attitude for restraining total strain energy is searched by Direct Search Method. Some numerical tests are carried out with a truss-type robotic architecture and a 3-link manipulator, and the results show a possibility of using strain energy as a new parameter for attitude determination and motion planning.

Key Words: Attitude Determination, Motion planning, Finite Element Method, Strain Energy, Direct Search Method

1. はじめに

ロボットの軽量化は従来から重要視されてきたが、これには機構強度が低くなるという欠点がある。また、将来的には多様な環境・作業に柔軟に対応することが要求される汎用ロボットの出現が期待されており、こうしたロボットでは、突然の過大な外力に対しても部材降伏が生じないようにすることが求められる。以上のようなロボットの強度上の問題を解決するためには、適切な強度設計を行った上で、さらに部材強度を指標にした姿勢決定や動作計画を行い、外力に応じた適切な動作軌道を与えて部材降伏を防止することが有効な手段になり得るものと思われる。

他方、ロボットの姿勢決定および動作計画については、従来から様々な議論がされており、可操作度に着目した研究[1][2]、消費エネルギーの最小化[3]や複数ロボットの協調作業を目指した研究[4]などが行われてきた。これらの研究では一般的に、ロボットの構成部材を剛体とし、リンク部材よりもモータなどの駆動部の方が損壊しやすいと仮定することが多く、部材強度を考慮したロボットの姿勢決定や動作計画はほとんど実施されていない。一方、構造工学の分野では、従来から外力による部材変形や発生応力に着目し、目的に応じた適切な構造物の形態を決定する研究など[5][6][7]が行われてきた。だが、これらの研究には、機構の姿勢が能動的に変化するという、ロボットの要素は含まれていなかった。

そこで本研究では、ロボットを構造工学的に捉えて有限要素法(FEM)による構造解析を行い、部材強度を考慮したトラス型ロボット機構の姿勢決定およびマニピュレータの動作計画を行った。部材の強度的な危険性を示す指標としては、断面力レベルでの降伏危険性、および

外力によって機構内に蓄積される全ひずみエネルギーを用いた。本研究では、全ひずみエネルギーの抑制を目的とした姿勢や動作軌道を導出することにより、目標姿勢や軌道への正確な追従よりも、機構の強度的な安全性を優先した動作を実現させることを目的とした。

2. Shifted Integration 法 (SI 法)

有限要素法は、多様なモデルに対して適用可能な汎用解法であるという利点をもつが、精度の良い解を得るためには要素分割数を多くとる必要があり、自ずと計算時間が長くなってしまいうという欠点がある。そこで、特に骨組構造解析における効率的なモデル化手法として Shifted Integration 法 (SI 法) [8]が開発され、少ない要素分割数で十分な精度の解が得られることが確認された[9]。

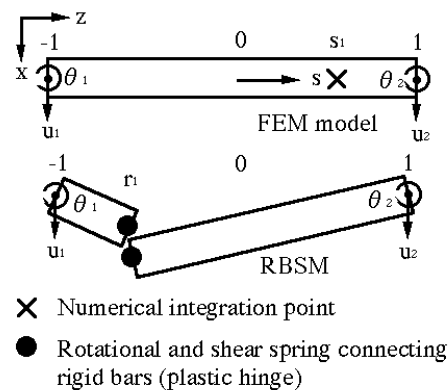


Fig.1 Linear Timoshenko beam element and its physical equivalent

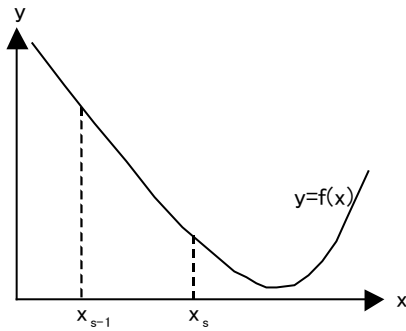


Fig.2 Direct Search Method

本研究では、SI 法を用いてロボット機構をモデル化することにより、計算時間の短縮化を図った。

SI 法では、回転・せん断ばね位置を陽に示した剛体・ばねモデル(RBSM)と有限要素のひずみエネルギー近似式の等価性を考慮することにより導出された、塑性ヒンジ(または関節)発生点と数値積分点との位置関係を使用する(図1参照)。有限要素として線形チモシェンコはり要素を用いた場合、関節位置 r と数値積分点位置 s の関係は $r = -s$ または $s = -r$ である。この式にしたがって、あらかじめ関節とは対称な位置に数値積分点をシフトしておくことにより、関節位置を正確に表現可能となる。さらに、回転・せん断ばねの曲げ剛性を正規化したパラメータ C_{mot} を定義した。 $C_{mot} = 0$ とすれば回転・せん断ばね位置にピン関節を、 $C_{mot} = 1$ とすれば剛節を表現することになる。

3. 全ひずみエネルギーの抑制を目的とした収束計算アルゴリズム

(1) 直接探索法による全ひずみエネルギーの極小化

ロボット機構内に蓄積される全ひずみエネルギーは、姿勢すなわち駆動部の移動量に依存する多変数関数である。このような多変数関数の極値問題を解くには、通常、Newton-Raphson 法などの導関数を用いた最適化手法が用いられることが多い。だが、全ひずみエネルギーはマトリクス計算により算出されるため、その導関数の定式化は非常に困難となる。また、モデル形状に依存して式の形が変化するため、アルゴリズムの汎用性が損なわれてしまう。したがって本研究では、導関数を用いた最適化手法は不適であると考え、単純かつ汎用性に富む直接探索法を用いて全ひずみエネルギーの極小化を図った。

直接探索法は1変数関数の極値を探索するための収束計算手法であり、変数の初期値と増分値を適当に与え、前後のステップにおける関数値の大小関係の比較を反復する。例えば図2に示すような関数 $f(x)$ の極小値を探索する場合は、前ステップ $s-1$ と現ステップ s との関係が $f(x_{s-1}) > f(x_s)$ であれば、変数増分値を変化させずに次ステップへ移行する。だが、 $f(x_{s-1}) < f(x_s)$ となる場合は、変数増分値を $-1/2$ 倍の値に置き換えて次ステップへ移行し、収束が判定されるまで反復処理を行う。なお、収束判定には次式の無次元化された条件式を用いた。

$$\left| \frac{x_s - x_{s-1}}{x_0} \right| < \alpha \quad (1)$$

ここで、 x_0 は変数の初期値である。また、 α は入力値として与える収束判定ノルムであり、小さくするほど得られる解の精度は上がるが、収束に要するステップ数は増大する。

本研究では、ロボット機構を構成する複数の駆動部に対して直接探索法を順に適用していくことにより、多変数関数である全ひずみエネルギーの極小値を探索した。

(2) 姿勢決定アルゴリズム

全ひずみエネルギーの抑制を図った姿勢を導出する場合、実用上は必ずしもその値を最小化する必要はなく、部材降伏が生じる危険性を回避するだけで十分である。そこで、臨界ひずみエネルギー U_C に抑制目標レベル k_U ($0 < k_U < 1$) を掛け、この値を全ひずみエネルギーの抑制目標値とした。ここで、臨界ひずみエネルギー U_C は機構が断面力レベルで部材降伏するときの全ひずみエネルギーの値であり、姿勢や外力などに依存して変化する。本姿勢決定アルゴリズムでは、まず臨界ひずみエネルギー U_C を算出し、次に複数の駆動部に対して順に直接探索法を適用し、目標レベル k_U まで全ひずみエネルギーが抑制された時点で姿勢を決定する。

(3) 動作計画アルゴリズム

本研究で構築した動作計画アルゴリズムでは、ロボットの動作軌道上で部材の断面力レベルでの降伏危険性が判定されると、前述した姿勢決定が行われ、得られた姿勢を経由して最終的な目標姿勢に向かう軌道が導出される。このように本動作計画アルゴリズムでは、ロボットが強制的に危険な姿勢になるたびに、安全な軌道を模索して軌道修正が行われる。本研究では、各要素の降伏危険性レベルの判定に次式を用いた。

$$f_y = \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}} \right)^2 = k_y \quad (2)$$

ここで、 N 、 M_x 、 M_y はそれぞれ、軸力、 x 、 y 軸回りの曲げモーメントであり、添字“0”は全断面塑性値であることを意味する。部材の断面力レベルでの降伏危険性は、初めにその判定レベル k_y ($0 < k_y < 1$) を設定し、上式の左辺の値が k_y を超えるか否かで判定した。 k_y を高く設定するほど、危険な姿勢になって初めて軌道修正が行われるようになる。逆に k_y を低く設定すると、それほど危険でなくても軌道修正が行われるようになる。また、時々刻々の姿勢決定では、一般的に抑制目標レベル k_U を降伏危険性レベル k_y より高く設定する物理的な意義はなく、本研究では $k_U = k_y$ とした。

4. トラス型ロボット機構の姿勢決定

図3に示すようなトラス型ロボット機構に対して、先端部分に静的水平荷重 $F = 1.0$ kN を与え、根元のリニアアクチュエータから順(Actuator 1 Actuator 2 ……)に直接探索法を適用して姿勢決定を行った。なお、各リニアアクチュエータの伸縮倍率を $0.9 \sim 1.1$ 倍と設定した。モデル化にあたっては、1リンク部材を2つの線形チモシェンコはり要素で表現した。また、対象モデルはトラス型であるため、構成要素の数値積分点を部材中央点にシフトかつ $C_{mot} = 0$ とし、部材両端にピン関節を表現した。直接探索法の収束判定ノルム α を 0.003 とし、全ひずみ

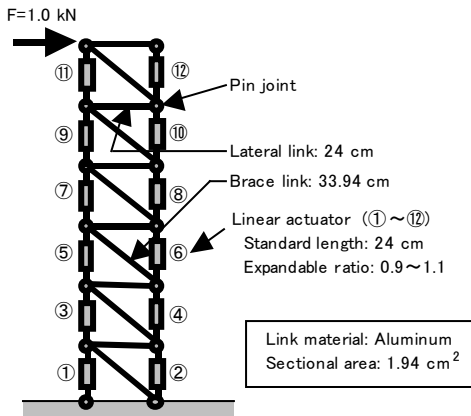


Fig.3 Truss-type robotic architecture

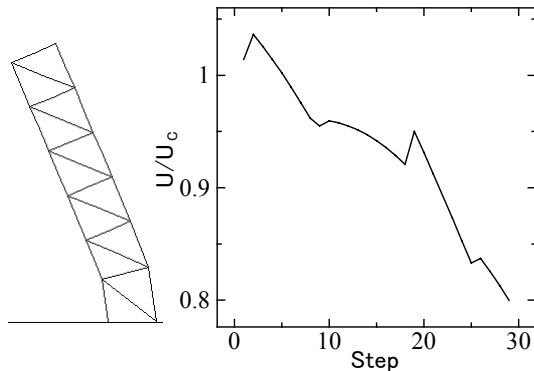


Fig.4 Obtained attitude and transition of total strain energy ($k_U = 0.003, k_U = 0.8$)

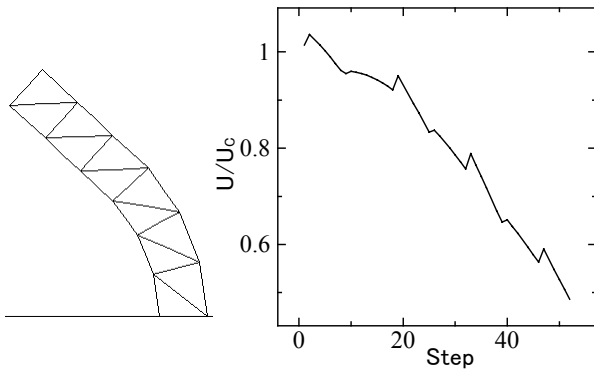


Fig.5 Obtained attitude and transition of total strain energy ($k_U = 0.003, k_U = 0.5$)

エネルギー U の抑制目標レベル k_U を 0.8, 0.5 とした場合の解析結果をそれぞれ図 4, 図 5 に示す. $k_U = 0.8$ と設定した場合には, Actuator 1 から 4 までに対して順に直接探索法が適用され, 全ひずみエネルギーが目標レベルまで抑制された. またそのとき, 外力方向に向かって倒れる姿勢が得られた. 次に, $k_U = 0.5$ と設定した場合には, Actuator 7 までのリニアアクチュエータに対して直接探索法が適用され, 全ひずみエネルギーが目標レベルまで抑制された. またこの場合には, $k_U = 0.8$ のときよりもさらに傾いた姿勢が得られた. なお, 1 ステップあたりに要した計算時間は約 0.42 秒 (Intel Pentium4 1.4GHz) であった.

次に, 直接探索法の収束判定ノルムを $\epsilon = 0.01$ とし, 全ひずみエネルギーの抑制目標レベルを $k_U = 0.8$ として同

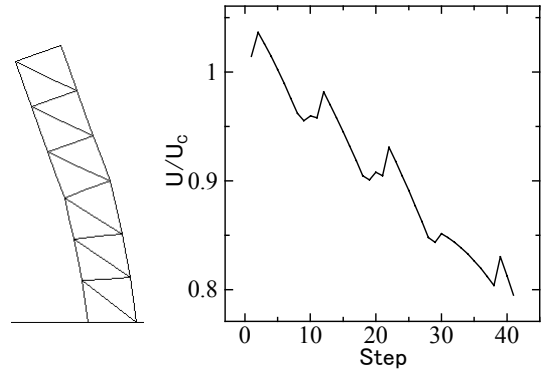


Fig.6 Obtained attitude and transition of total strain energy ($\epsilon = 0.01, k_U = 0.8$)

様の解析を行った. その結果, 図 4 に比べ, 1 本のリニアアクチュエータ当たりの収束計算に要するステップ数は減少したが, 直接探索法が適用されるリニアアクチュエータの本数は増大した (図 6 参照). これは, 任意のリニアアクチュエータに対する収束計算において, 得られる収束解の誤差が増大し, 十分に全ひずみエネルギーが抑制されないうちに次のリニアアクチュエータに対する収束計算に移行するためである. したがって, 総ステップ数を減少させて計算時間の短縮化を図るためには, 単一のリニアアクチュエータに対する収束計算に要するステップ数と直接探索法が適用されるリニアアクチュエータの数の兼ね合いを吟味した上で, 適切な収束判定ノルムを設定する必要がある.

5.3 リンクマニピュレータの動作計画

図 7 に示すような 3 リンクマニピュレータに対して図 8 に示す目標軌道を与えた場合について, 先端関節から順 (Joint 3 Joint 2 Joint 1) に直接探索法を適用して動作計画を行った. モデル化にあたっては, 前章のトラス型ロボット機構の場合と同様に, 1 リンク部材を 2 つの線形要素で表現した. また, モータに十分なトルクが発生していることを想定し, 関節部分は剛節 ($C_{mot} = 1$) とみなした.

降伏危険性の判定レベル k_y および全ひずみエネルギーの抑制目標レベル k_U をそれぞれ $(k_y, k_U) = (0.8, 0.5), (0.8, 0.2), (0.5, 0.5)$ とした場合に得られた動作計画と全ひずみエネルギーの推移を図 9, 図 10, 図 11 に示す. 全ひずみエネルギーの推移を示す図では, マニピュレータの姿勢が収束するまでがプロットされており, 得られた動作計画を示す図では, 収束計算により全ひずみエネルギーが目標値にまで抑制された時点での姿勢が示されている. なお, 図 9 および図 11 では, 軌道修正回数が膨大であるため,

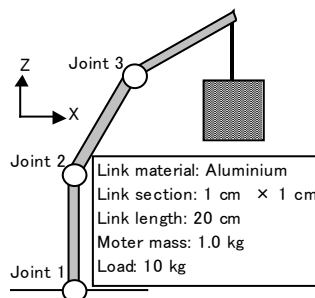


Fig.7 3-link manipulator

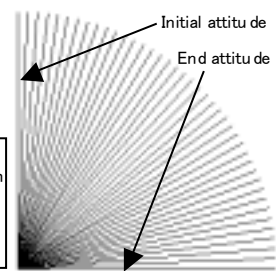


Fig.8 Target trajectory

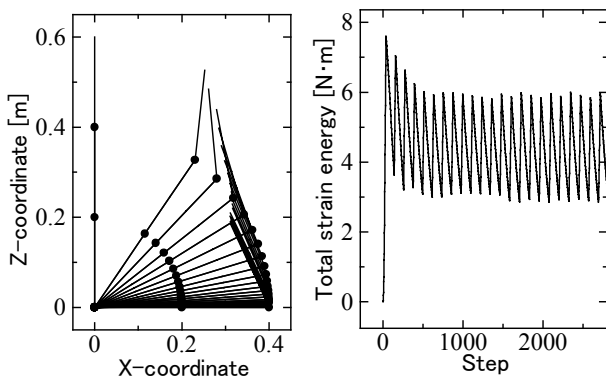


Fig.9 Obtained motion plan and transition of total strain energy ($k_y = 0.8, k_U = 0.5$)

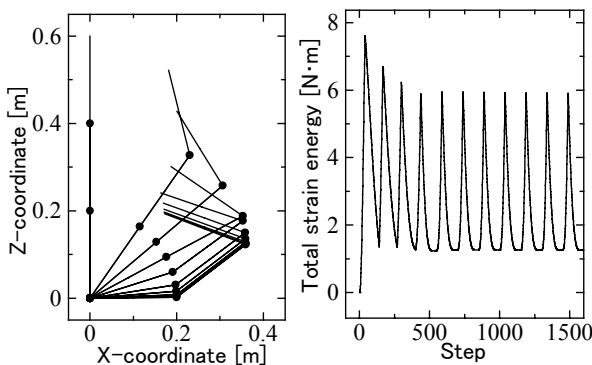


Fig.10 Obtained motion plan and transition of total strain energy ($k_y = 0.8, k_U = 0.2$)

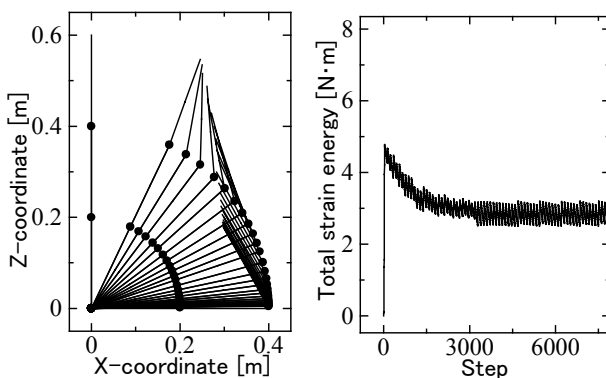


Fig.11 Obtained motion plan and transition of total strain energy ($k_y = 0.5, k_U = 0.5$)

得られた動作計画は3つおきに示した。

本解析では、全ひずみエネルギーの抑制を目指して小刻みな軌道修正が繰り返され、最終的には唯一の姿勢に収束するような動作計画が導出された。その結果、目標軌道への正確な追従は実現しなかったが、先端部分を根元部分に近づけ、根元部分に発生する曲げモーメントを緩和するような軌道が得られた。計算時間は、図10の場合で約5分28秒であった (Intel Pentium4 1.4GHz)。

本解析結果より、 k_y を高く設定し k_U を低く設定すると軌道更新の回数が減少し、目標軌道から大きくずれた動作計画が得られることが分かった。これは、降伏危険性判定時と全ひずみエネルギー抑制後の姿勢が大きく異なり、その結果、降伏危険性が再判定されにくいように軌道が大きく修正されるためである。本アルゴリズムで最も計

算時間を要するのは降伏危険性判定後の姿勢決定であり、判定回数が減少すれば計算時間は大幅に短縮される。したがって、できるだけ k_y を高く、 k_U を低く設定することが好ましい。このように設定することにより、強度的に危険なギリギリの状態まで動作し、判定後の軌道修正では極端に安全な姿勢をとろうとするような、人間などの動作に酷似した興味深い動作計画が実現する。これは、実用的な観点でも有効であると思われる。

6. 結論

本研究では、部材強度を指標にしたロボットの姿勢決定および動作計画の必要性を示唆し、全ひずみエネルギーの抑制を目的としたロボット機構の姿勢決定および動作計画を行った。姿勢決定では、全ひずみエネルギーが目標レベルまで抑制された姿勢を導出した。また動作計画では、前述した姿勢決定を動作中のロボットに適用させ、強度的に危険な姿勢を回避する動作軌道を導出した。その結果、以下の知見を得た。

トラス型ロボット機構の姿勢決定では、多くのリニアアクチュエータを伸縮させ、外力方向に向かうような姿勢をとらせることにより、全ひずみエネルギーがより小さな値にまで抑制され、強度的な安全性を確保することができることが分かった。また、マニピュレータの動作計画では、機構の強度的な危険性が高くなって初めて全ひずみエネルギーを小さな値にまで抑制するような軌道修正を行うと、軌道修正回数が少なく効率的で、かつ人間の挙動に酷似した興味深い動作計画が安定的に得られることが分かった。

今後は、動的効果の考慮およびリアルタイム処理を目指したアルゴリズムを開発し、より実用的な姿勢決定・動作計画法を構築していきたい。

参考文献

- [1] 吉川恒夫, ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, 第2巻, 第1号, pp.63-67, 1984.
- [2] 平山 智信, 永谷 圭司, 五福 明夫, 可操作性を考慮した移動マニピュレータの動作計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-B5, 2001.
- [3] 小野京右, 劉栄強, 2足歩行ロボットの最適軌道計画解 (第1報. 最適軌道解析法と全関節駆動系の最適解), 日本機械学会論文集 (C編), 第67巻, 第660号, pp.2601-2608, 2000.
- [4] 毛利彰, 平野剛, 山本元司, 2台のマニピュレータの協調動作経路計画, 計測自動制御学会論文集, 第34巻第8号, pp.935-940, 1998.
- [5] 半谷裕彦, 川口健一, 形態解析 一般逆行列とその応用, 培風館, pp.110-140, 1991.
- [6] 伊藤純一, 田川 浩, 大崎 純, 一樣部材断面積を有する立体トラスの形状最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.20189, pp.377-378, 1999.
- [7] 中桐滋, 野口裕久, 谷国一, 応力に基づく構造形状の有限要素シンセシス. 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第12巻, pp.97-102, 1988.
- [8] 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.
- [9] 都井裕, 梁洪鐘, 骨組構造の崩壊シミュレーション (その1) 定式化および簡単な数値例, 日本造船学会論文集, 第166号, pp.285-294, 1989.