

ひずみエネルギーの抑制を目的としたマニピュレータの動作計画

Motion Planning of Manipulators for Restraining Strain Energy

石井悠一郎（筑波大院） 正 磯部大吾郎（筑波大）

This paper describes a new way of motion planning of manipulators by aiming restraint of total strain energy stored in the architectures. By this motion planning, a manipulator can avoid yielding of its constituting link members. In the algorithm, when the risk of member yielding becomes higher while a manipulator is in motion, a safe 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 3-link manipulator, and the results show a possibility of using strain energy as a new parameter for motion planning.

Key Words: Motion planning, Finite Element Method, Strain energy, Direct Search Method

1. 緒言

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可能な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、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とした動作計画を行い、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り[1][2]、消費エネルギー最小化[3]や複数ロボットの協調作業[4]を目指したりする研究が行われてきた。しかし一般的に、ロボットの構成部材は剛体であると考えたり、リンク部材よりモータなどの駆動部の方が損壊しやすいと考えたりする傾向が強く、部材強度を考慮したロボットの動作計画はほとんど研究されていない。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]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、ロボットの重要な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。本動作計画では、全ひずみエネルギーの抑制を目的とした動作軌道を導出することにより、目標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ている。

2. 部材強度を考慮した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、マニピュレータ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、全ひずみエネルギーを指定目標値にまで抑制した姿勢が収束計算により決定され、その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。このように本アル

ゴリズムでは、マニピュレータが強度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。

部材の断面力レベルでの降伏危険性は、次式に示す降伏関数 f_y の値が指定レベル k_y ($0 < k_y < 1$) を超えるか否かで判定される。

$$f_y \equiv \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}} \right)^2 = k_y \quad (1)$$

ここで N 、 M_x 、 M_y はそれぞれ、軸力、 x 、 y 軸回り曲げモーメントであり、添字“0”は全断面塑性値を意味する。 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。

時々刻々の姿勢決定では、反復収束計算によって1変数関数の極値を探索する直接探索法を用い、全ひずみエネルギーを指定目標値にまで抑制した姿勢が導出される。なお、マニピュレータに蓄積される全ひずみエネルギーは、姿勢すなわち関節角に依存する多変数関数となるため、各関節角に対して順に収束計算を行うことにより、系全体としての極小値が探索される。また、全ひずみエネルギーの抑制目標値は、臨界ひずみエネルギー U_C と抑制目標レベル k_U ($0 < k_U < 1$) との積とする。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。また、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。

3. 3リンクマニピュレータの動作計画

Fig.1に示すような3リンクマニピュレータに対してFig.2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)に収束計算を行った。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 $(k_y, k_U) = (0.8, 0.5)$, $(0.8, 0.2)$, $(0.5, 0.5)$ とした場合の動作計画と全ひずみエネルギーの推移をFig.3, Fig.4, Fig.5に示す。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、モータに十分なトルクが発生していることを想定し、関節部分は剛節とみなした。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 Fig.3 および Fig.5 では、軌道修正回数が膨大であるため、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行われた。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 Fig.4 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修正の回数が減少し、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、強制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。

4. 結論

本報告では、部材強度を指標にしたロボットの動作計画の必要性を示唆し、全ひずみエネルギーを抑制させることによって強制的に危険な姿勢を回避するマニピュレータの動作計画を行った。その結果、機構の強制的な危険性が高くなって

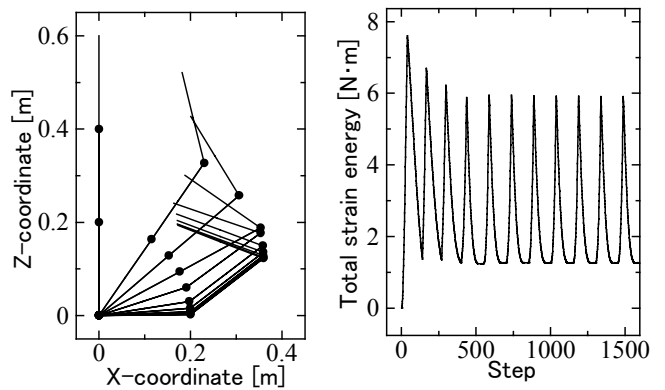


Fig.4 Obtained motion plan and transition of total strain energy ($k_y = 0.8, k_U = 0.2$)

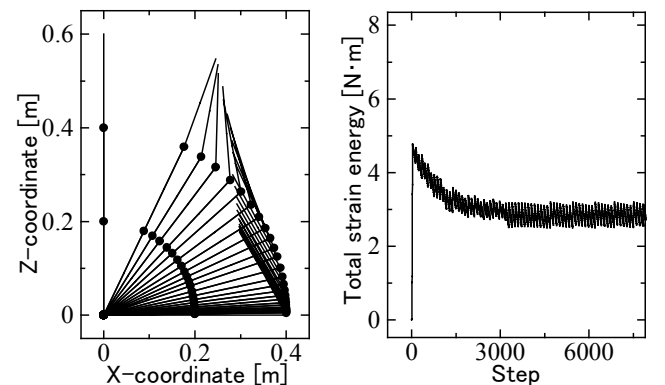


Fig.5 Obtained motion plan and transition of total strain energy ($k_y = 0.5, k_U = 0.5$)

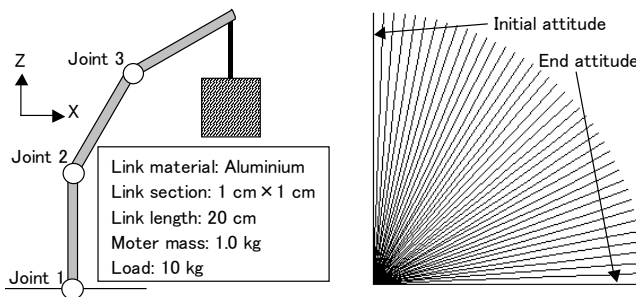


Fig.1 Analyzed Model

Fig.2 Target trajectory

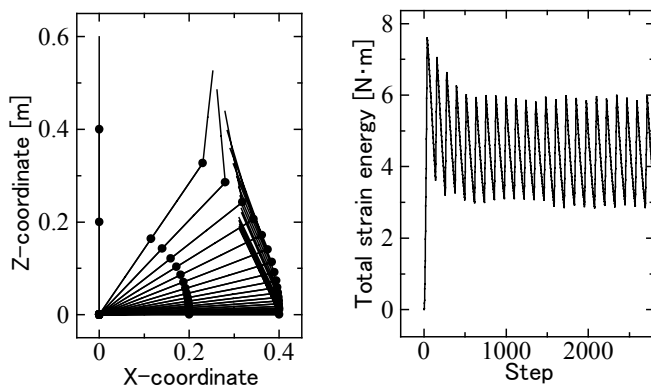


Fig.3 Obtained motion plan and transition of total strain energy ($k_y = 0.8, k_U = 0.5$)

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, 劉宋強, 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(計算力学とCAEシリーズ5), 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.