

構造力学的パラメータを導入したマニピュレータの動作計画

Motion Planning of Manipulators Using Structural Parameters

○ 小松祥人 (筑波大院) 正 磯部大吾郎 (筑波大)

In this paper, motion planning of robotic architecture considering its structural strength is applied to a 3-link manipulator, modeled by using cubic beam elements based on the Bernoulli-Euler hypothesis. In the motion-planning algorithm, 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. Risk for member yielding and total strain energy are calculated by using the Finite Element Method (FEM), and an attitude for restraining total strain energy is searched by using the Direct Search Method (DSM). Some numerical tests are carried out on a 3-link manipulator and effective motion plans are obtained. Furthermore, the motion-planning algorithm is implemented to an experimental system to verify the validity and practicability.

Key Words: Motion planning, Finite Element Method, Manipulators, Structural parameters

1. はじめに

ロボット技術の研究・開発において、機構の軽量化は、動作の高速化、消費エネルギーの軽減や安全性などの点から重要視されている。しかしその一方で、軽量化によって機構の強度が低下し、破損の可能性が高まるという問題が生じる。通常、工場の産業用ロボットなど、限定された作業をこなすものは、その作業の負荷と強度を考え適切な設計がなされる。したがって、重量物を運搬する場合などは、その負荷に耐え得るように機構も重厚なものとなり破損しにくくなるが、接触等により外界に対して危害を加える危険性も高くなる。一方、生活支援ロボットや福祉関連ロボットなどといった人間と共存することを目指すロボットは、人間に危害を加えないように軽く、しかも様々な作業が行える機構であることが望まれる。また、突然の外力等によって機構が破損しないような対策も求められる。このような様々な環境にさらされる可能性の高いロボットには、最適設計がなされた上で、その動作段階で外力に対して安全な姿勢をとらせることが、機構の破損を回避する有効な手段の一つであると考えられる。これは普段、人間が作業の負担を軽減するために様々な姿勢をとることからも想像できる。

以上のような観点から、構造力学的パラメータを導入したロボット機構の姿勢決定・動作計画法が開発された^[1]。本手法は、有限要素法(FEM)を用いた内力分布解析により、断面力レベルでの部材の降伏危険性や機構内に蓄積される全ひずみエネルギーを監視することで、機構にとって危険な姿勢を回避しようというものである。本報告では、この動作計画法に対し、曲げ変形に対する精度の高い Bernoulli-Euler の仮定に基づく 3 次はり要素を導入し、計算コストのさらなる低減を図った。また、本アルゴリズムを導入したインターフェースを作成し、実機による模擬実験を行い、その有効性・実用性について検証した。

2. 構造力学的パラメータを導入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再作成される。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 の値が降伏危険性判定レベル 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、軸力および x , y 軸回りの曲げモーメントを示し、添字 '0' は全断面塑性値であることを意味する。また、 M_x , M_y については、はり理論にしたがって常に最大値をとる位置、すなわち要素端での値を求め、これを使用する。 k_y を高く設定するほど部材の強度を活用することになり、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。

全ひずみエネルギーを抑制した姿勢を決定する場合、反復収束計算により 1 変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まで抑制した姿勢を導出する。機構内に蓄積される全ひずみエネルギーは、姿勢すなわち関節角に依存する多変数関数であるため、各関節に対して直接探索法を適用し、系全体としての極小値を探索する。また、全ひずみエネルギーの指定目標値は、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際の全ひずみエネルギー値である。この値は、機構の姿勢や外力の付加条件によって変化するため、姿勢が修正されるたびに計算される必要がある。

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、直立状態維持を目標とした 3 リンクマニピュレータに対し、その先端に荷重を加えた場合の動作計画を実施した。モデル化においては、1 リンク部材を 1 つの 3 次はり要素で表現した。また、モータには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。外力の付加条件は、水平方向に 100[N] を与えた場合(case 1)、水平方向 100[N] と同時に垂直方向にも 80[N] を与えた場合(case 2)とした。 $(k_y, k_U) = (0.7, 0.64)$ とし、直接探索法を先端関節から順(Joint 3 → Joint 2 → Joint 1)に適用した場合に得られた動作計画を Fig.2 に示す。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。水平方向にのみ荷重を与えた場合(case 1)は、初めに機構の負担を軽減するためにその荷重方向に沿って姿勢を倒すように姿勢変更を行っている。一方、水平方向と垂直方向荷重を同時に加えた場合(case 2)には、マニピュレータの先端を荷重方向に向かって傾けるように姿勢変更が行われた。これは、荷重方向に対して有効な軸剛性を最大限に利用し、ひずみエネルギーを抑制しているものと考えられる。このように、初めに荷重の大きさと方向に応じた安全な姿勢をとり、その後軌道修正を繰り返しながら徐々に目標姿勢へと近づいていく動作軌道が得られた。

4. 実験

次に、マニピュレータに加わる外力を検出するための力覚センサを実機に搭載し、本動作計画アルゴリズムとの間のインターフェースを作成した。力覚センサには BL AUTOTECH 社製ビーエル・NANO センサ(2.5/2)を使用し、Fig.3 に示すように、マニピュレータの先端にマスコネテナとともに取り付けられた。そして、時々刻々変化する外力に対し実時間で動作計画を実行し、その動作過程を確認する実験を行った。マニピュレータのモデル化は前節と同様とした。

実験では $(k_p, k_v) = (0.7, 0.64)$ と設定し、直立状態維持を目標とする3リンクマニピュレータに対し、その先端に斜め下方向へ荷重を加えた(前節 case 2 と同様)。なお、本実験は動作過程の確認を目的とするため、実際には大きな荷重は加えず、力覚センサから得られた値を100倍して外力値とした。ここで、力覚センサから検出された外力値を Fig.4 に示す。また Fig.5 では、(a), (b), (c), (d)の順にマニピュレータが姿勢変更した時の様子を示す。

荷重を加えると、Fig.5(b)のように先端リンクを荷重方向に対抗するように傾け、軸剛性を利用して機構の負担を軽減する姿勢をとった。そして、ひずみエネルギーを抑制した安全な姿勢が得られると、腕を引くようにしてマニピュレータ先端を目標位置へ近づけた(Fig.5(c))。その後も荷重を加え続けると、Fig.5(d)のようにその荷重に応じて先端リンクの傾きを調整し、柔軟に姿勢を変化させる様子が観察された。

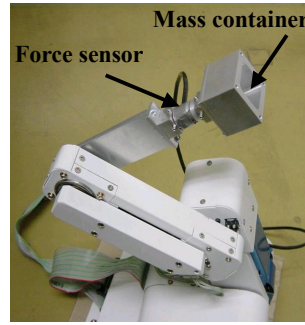


Fig.3 3-link manipulator used in the experiments

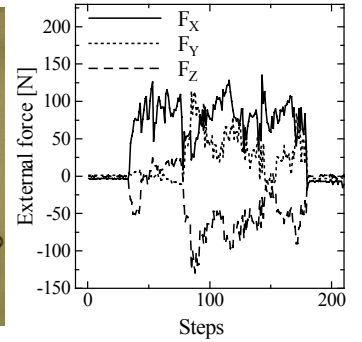
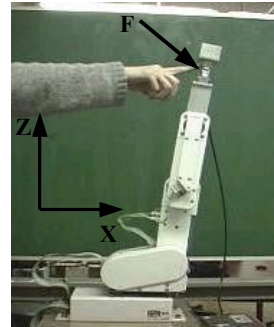


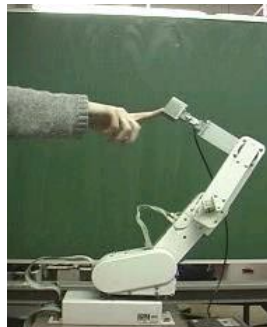
Fig.4 External force detected at the tip of the manipulator



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.5 A motion of the 3-link manipulator

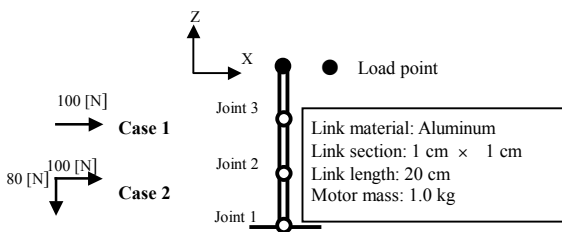
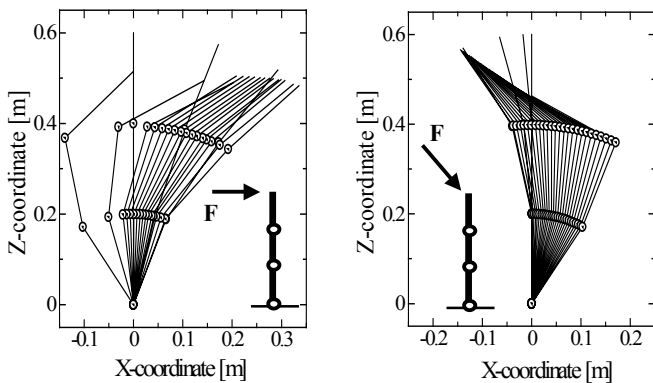


Fig.1 Analyzed model



(1) Case 1

(2) Case 2

Fig.2 Obtained motion plan ($k_p = 0.7, k_v = 0.64$)

5. 結論

本研究では、構造力学的パラメータを導入した動作計画法に対し3次はり要素を適用し、マニピュレータの動作計画を実施した。その結果、荷重の大きさと方向に応じて適切に姿勢を変化させ、機構の強度的危険性を回避する軌道が得られた。また、本動作計画アルゴリズムを実機に適用し、力覚センサからの入力に対する動作実験を行った結果、解析と同様の動作過程が観察された。外力の時々刻々の微妙な変化に応じて適切に姿勢変更が行われたことより、動作計画法とインターフェースの信頼性を確認することができたものと思われる。

今後は、構造力学的パラメータの詳細検討、より効率的な収束計算法の導入による短時間処理可能なアルゴリズムの開発、および動的効果の考慮などを行っていく予定である。

参考文献

- [1] 磯部 大吾郎, 石井 悠一郎, 構造強度に着目したロボット機構の姿勢決定および動作計画, 日本ロボット学会誌, 第22巻, 第1号, pp.75-82, 2004.