

機構の強度的安全性を優先したマニピュレータの動作計画

小松祥人(筑波大院) 磯部大吾郎(筑波大)

Motion Planning of Manipulators with Structural Safety as Priority

*Akihito KOMATSU, Graduate School, Univ. of Tsukuba, Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba

Abstract - In this paper, a motion-planning scheme of manipulators to avoid structural failure is described. In this method, manipulators are encouraged to protect themselves from structural failure by searching a safer attitude rather than to accomplish the given tasks in case their structural risk becomes high. The structural risk is judged by using two parameters, risk for member yielding and total strain energy stored in the architectures, which are calculated by using the Finite Element Method (FEM). Three schemes of motion planning using the structural parameters are compared by carrying out some numerical tests. Furthermore, the motion-planning algorithm is implemented into an experimental system with low-stiffness member to verify its validity.

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

1. はじめに

ロボットの軽量化は、動作の高速化や消費エネルギーの軽減、安全性等の点から重要視される。しかしその反面、軽量化は機構強度の低下につながり、破損の可能性が高まるという問題も生じる。近年研究が盛んな福祉関連ロボットや生活支援ロボットなど、人間との共存を目指すロボットにおいては、人間に危害を加えないように軽く、しかも多種多様な環境や作業に柔軟に対応できることが望まれる。このような汎用的なロボットにおいては、適切な強度設計とともに、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1つであると考えられる。

従来、ロボットの姿勢決定や動作計画については様々な研究が行われており、タスク遂行のための効果的な姿勢決定法の開発を目的とした研究[1][2]などもある。しかしながら、これまでのロボットの研究において、アシモフの3原則第3条のような「自己を守る」という観点での研究例は少ない。そこで、ロボット機構を構造工学的に捉え、その強度的な危険性を評価し、場合によってはタスクの遂行よりも機構の破損回避を優先させるような動作計画法が提案された[3]。これは、有限要素法を用いた構造解析を時々刻々行い、断面力レベルでの部材降伏危険性と機構に蓄積される全ひずみエネルギーという2つのパラメータにより姿勢を変更し、機構の強度的危険性を回避する手法である。

本報告では、以下に示すような2つの構造力学的パラメータを用いた動作計画法について検証した。

- ・ 全ひずみエネルギーのみを用い、その極小化を行う手法(Scheme A)
- ・ 断面力レベルでの部材の降伏危険性判定後、その抑制を行う手法(Scheme B)
- ・ 断面力レベルでの部材の降伏危険性判定後、全ひ

ずみエネルギーを抑制する手法(Scheme C)

さらに、本動作計画アルゴリズムを導入したインターフェースを作成し、低剛性のリンク部材を使用した実機による動作実験を行い、本手法の有効性について検証した。

2. 動作計画アルゴリズム

本章では、全ひずみエネルギーのみを用いた動作計画法(Scheme A)と断面力のみを用いた手法(Scheme B)およびこれら2つのパラメータを組み合わせた手法(Scheme C)について説明する。

2.1 全ひずみエネルギーを用いた動作計画法

機構に外力が作用すると、その中にはひずみエネルギーが蓄積される。したがって、機構内に蓄積された全体のひずみエネルギーを減少させることで、機構に加わる負担を軽減できると考えられる。本節では、ロボットの動作において機構内に発生する全ひずみエネルギーを常に抑制することで安全な姿勢を得ようという動作計画法(Scheme A)について説明する。

機構内に蓄積される全ひずみエネルギーは、姿勢すなわち駆動部の移動量に依存し、本研究では次式に基づき有限要素法により数値的に求める。

$$U = \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \sum_{i=1}^n \{\varepsilon\}_i^T \{\sigma\}_i l_i \quad (1)$$

ここで、 i は要素番号、 n は総要素数、 $\{\varepsilon\}_i$ は i 番目のひずみベクトル、 $\{\sigma\}_i$ は断面力ベクトル、 l_i は要素長である。このような多変数関数で表される全ひずみエネルギーを抑制するために、直接探索法を適用しその極小値を探索する[3]。機構を構成する複数の駆動部に対し、収束判定がなされるまで直接探索法を適用することで、機構内の全ひずみエネルギーを極小化した姿勢を導出する。

2.2 断面力を用いた動作計画法

本節では、機構内に発生した断面力に着目した動作計画法(Scheme B)について説明する。

本手法では、機構の部材破損を回避するため、断面力レベルでの部材降伏危険性を監視する。そして、ロボットの動作中に降伏危険性が判定された場合には、断面力を抑制した安全な姿勢を探索し、得られた姿勢を経由して最終的な目標姿勢へ向かう軌道が再作成される。

機構を構成する各部材の降伏危険性の判定には、次式に示す降伏関数 f_y を用い、この式の左辺が指定した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。

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

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”は全断面塑性値を意味する。 k_y を大きく設定するほど部材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 を小さく設定すると、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。そして、ある部材の降伏危険性が判定されたならば、直接探索法を適用して f_y の値があらかじめ設定した抑制目標値 F_t ($0 < F_t < k_y$) 以下になるように断面力を抑制した姿勢を探索する。なお、 f_y は要素ごとに算出されるため、それらのうちの最大値をその都度採用し、その値が F_t 以下になった時点で姿勢を決定する。また、直接探索法の収束判定には次式を用いた。

$$|f_{ys} - f_{ys-1}| < \alpha \quad (3)$$

ここで、 α は収束判定ノルムであり、この値を小さく設定するほど得られる解の精度は向上するが、その分計算時間を多く要することとなる。

以上のように、Scheme B は、各部材ごとの断面力という局所的な情報に着目した動作計画法である。

2.3 全ひずみエネルギーと断面力を用いた動作計画法

本節では、全ひずみエネルギーと断面力レベルでの部材降伏危険性の 2 つのパラメータを組み合わせた手法(Scheme C)について説明する。

本手法では、機構の強度的な危険性については、Scheme B と同様に断面力によって監視するが、危険性が判定された場合には、直接探索法を適用し全ひずみエネルギーを抑制した姿勢を導出する。全ひずみエネルギーを抑制した姿勢を決定する場合、実用上必ずしもその値を極小化する必要はなく、部材降伏が回避されるのみで十分であると考えられる。そこで、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の値を臨界ひずみエネルギー U_c と定義し、これ

と抑制目標レベル k_U との積を全ひずみエネルギーの抑制目標値とした。臨界ひずみエネルギー U_c は姿勢や外力の作用方向などによって変化するため、姿勢が修正されるたびに計算する必要がある。

このように Scheme C は、局所的な情報である断面力によって機構の強度的な危険性を監視し、危険性が判定されたならば、全体的な情報である全ひずみエネルギーを抑制した姿勢を導出する。

3. マニピュレータの動作計画

本章では、2章で説明した Scheme A、B、C の 3 つの手法を適用した解析を行い、それぞれの手法の特徴について検証した。

3.1 開リンク機構

Fig.1 に示すような 3 リンクマニピュレータに対し、Fig.2 に示す目標軌道を鉛直面内で与えた場合について動作計画を実施した。1 リンク部材を 1 つの 3 次はり要素でモデル化した。関節には十分なトルクが発生していることを想定し、剛節とした。姿勢探索においては、根元関節の回転はその先に接続されるリンクの移動に大きく影響してしまうため、マニピュレータ先端の位置をできるだけ目標位置に近づけるといった観点から、先端関節から順(Joint 3 Joint 2 Joint 1)に直接探索法を適用した。また $\alpha = 0.01$ と設定し、Scheme B では $(k_y, F_t) = (0.8, 0.3)$ 、Scheme C では $(k_y, k_U) = (0.8, 0.3)$ と設定した。

Fig.3、4、5 に結果を示す。図では、姿勢探索で得られた姿勢のみを示す。全ひずみエネルギーのみを用いた Scheme A(Fig.3)では、目標姿勢に近づくという動作は見られなかった。これは、全ひずみエネルギーを極小化することで姿勢が 1 つに収束してしまうためと考えられ、ロボットなどのように移動や姿勢を変えることで作業を行う機構に適用する場合には、本手法は不適切であると言える。

一方で、断面力のみを用いた結果(Fig.4)と全ひずみエネルギーと断面力を組み合わせた結果(Fig.5)を比較すると、どちらも先端リンクを根元方向へ引き寄せ曲げモーメントの増大を防ぎ、機構の負担を軽減するような軌道が得られた。両者の結果がよく似て

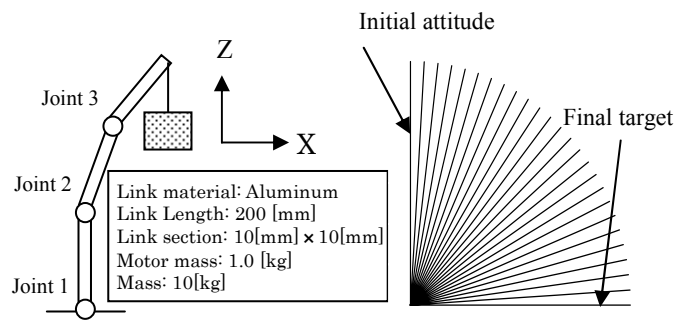


Fig.1 3-link manipulator

Fig.2 Target trajectory

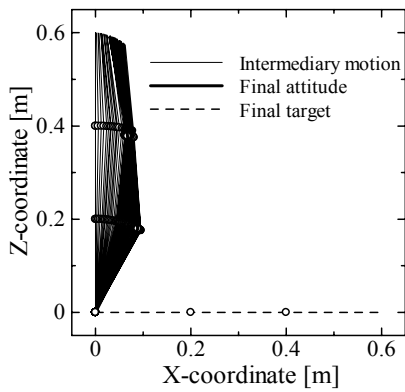


Fig.3 Obtained motion plan by Scheme A

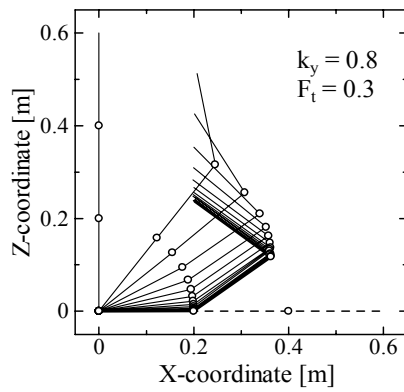


Fig.4 Obtained motion plan by Scheme B

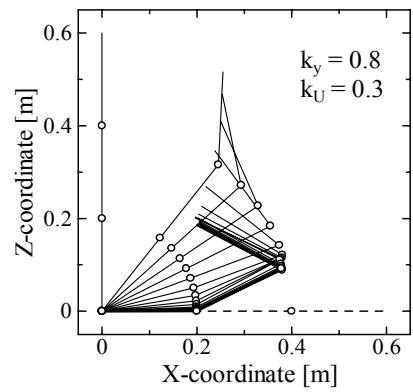


Fig.5 Obtained motion plan by Scheme C

いるのは、今回のタスクにおいては、常にマニピュレータの根元リンクに最も大きな負担がかかり、全ひずみエネルギーおよび断面力の抑制のどちらを目標にしても、根元部分の負担を軽減させるために採り得る姿勢がほぼ一致がするためである。

3.2 閉リンク機構

本節では、2つのアームが協調して荷物を移動させることを想定したタスクを与え、解析を行った。マニピュレータのモデル化においては、Fig.6のような機構を考え、部材などは前章と同様(Fig.1 参照)に設定した。関節はJoint 3をピン関節とし、他は剛節とした。Fig.7のような軌道を与え、それぞれの手法を適用し、動作計画を実施したところ、それぞれFig.8,9,10のような結果が得られた。なお、直接探索法は、前節と同様な理由からJoint 2 Joint 1の順に適用し、収束判定ノルム = 0.001と設定した。

全ひずみエネルギーのみを用いた手法(Fig.8)では、前章と同様に目標姿勢に近づいていくような動作は得られなかった。また、断面力のみを用いた手法(Scheme B)と全ひずみエネルギーと断面力を用いた手法(Scheme C)での結果を比較すると、姿勢変更の過程は異なるが、どちらも同様の姿勢に収束しており、荷物を持つ位置(Joint 3)に着目しても、目標位置の近

くまで達していることが確認できる。

本章で与えたタスクにおいては、Scheme B と Scheme C とでは、両者にあまり違いは見受けられなかった。どちらの手法も機構の安全性を考慮するという点では有効的であると考えられる。さらに言えば、Scheme Cは全ひずみエネルギーの抑制を行うため、エネルギー効率の観点からも効果的であると思われる。

4. 実験

本研究では、マニピュレータに加わる外力を検出するための3軸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_AUTOTEC社製ビーエル・NANOセンサ(2.5/2)を使用し、Fig.11に示すようにマニピュレータ先端に取り付けた。先端リンクは断面

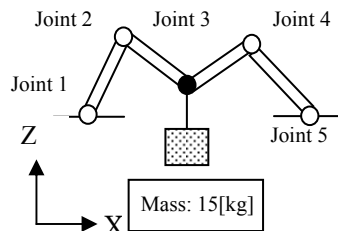


Fig.6 Closed link manipulator

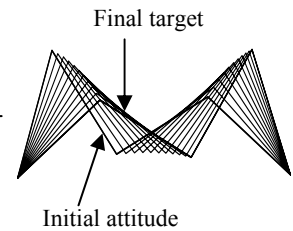


Fig.7 Target trajectory

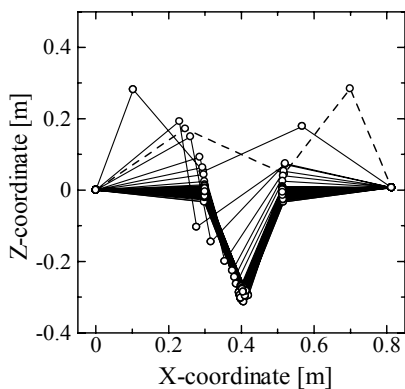


Fig.8 Obtained motion plan by Scheme A

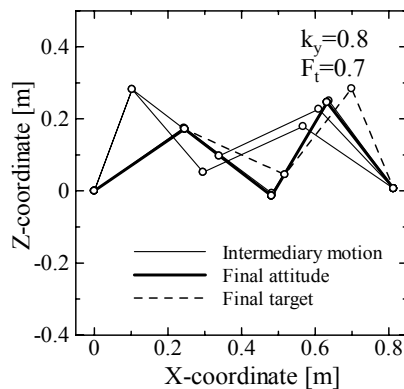


Fig.9 Obtained motion plan by Scheme B

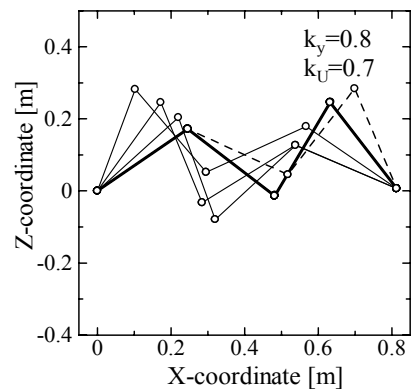


Fig.10 Obtained motion plan by Scheme C

直径が 4[mm]，リンク長 248[mm]のアルミニウム製 (A1070)の丸棒である．また，(2)式の f_y を求める際に使用する降伏応力としては，0.2%耐力値である 31 [N/mm²]を採用した．そして，外力に対して実時間で動作計画を実施し，本手法の有効性を検証した．なお，本実験では，エネルギー効率の観点から有効と思われる，全ひずみエネルギーと断面力の 2 つを組み合わせた手法(Scheme C)を適用した．

マニピュレータに与えるタスクとしては，3.1 節と同様に，先端に重り(264[g])を持たせて Fig.2 の軌道を与えた．そして，そのままタスクを遂行する場合 (Case A)と，本手法を実施して機構の安全性を優先させた場合(Case B)で実験を行い，実験後の先端リンクの状態を検証した．なお， $(k_y, k_U)=(0.8, 0.4)$ ， $\epsilon=0.0005$ と設定した．Case A および Case B について，(a) (b) (c)の順にマニピュレータが姿勢変更していく様子をそれぞれ Fig.12, 13 に示す．また，実験後の先端リンクを水平視点からリンクの軸方向を観察した図をそれぞれ Fig.14, 15 に示す．これらの図では，左側に実験で使用したリンク，右側に使用していない同一のものを並べてある．

実験の様子を見ると，Case A では姿勢が水平状態になったときに，リンクが大きくたわんでいるのが確認できる．また，実験後のリンクの状態を見ると，永久変形が生じていることが確認できる．その変形量は，リンク長に対して 0.56%であった．一方，動作計画を実施した Case B では，Fig.13 のように先端リンクを傾けながら徐々に腕を降ろしていくような動作が得られた．また，実験後のリンクの状態を確認すると，実験に使用していないリンクと比較してもその変化は認められなかった．

以上のことから，本動作計画法が機構の強度的な

安全性を確保する上で有効であることが確認された．

5. おわりに

本研究では，機構の構造強度に着目し，断面力レベルでの部材降伏危険性と全ひずみエネルギーという 2 つの構造力学的パラメータを用いた動作計画法について検証した．その結果，全体的な情報である全ひずみエネルギーのみを用いた場合は良好な結果は得られないが，局所的な情報である断面力を導入すると，強度的安全性を優先した動作軌道が効果的に得られることが確認された．また，本動作計画法を実機に適用し実験を行ったところ，リンク部材の破損を回避する動作が得られた．

今後は，3次元での解析および動作実験を行っていく予定である．

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,Vol.2,No.1,pp.63-67,1984.
- [2] 清水政宏,琴坂信哉,大滝英征：“人間型ロボットの機構自由度の縮退を利用した動作-縮退の分類と有効性の検証-”，第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集,2002.
- [3] 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,Vol.22,No.1,pp.75-82,2004.

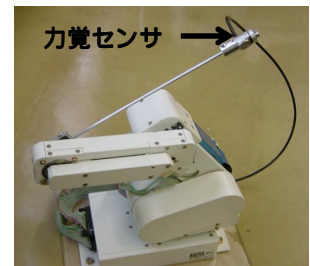


Fig.11 3-link manipulator used in the experiment

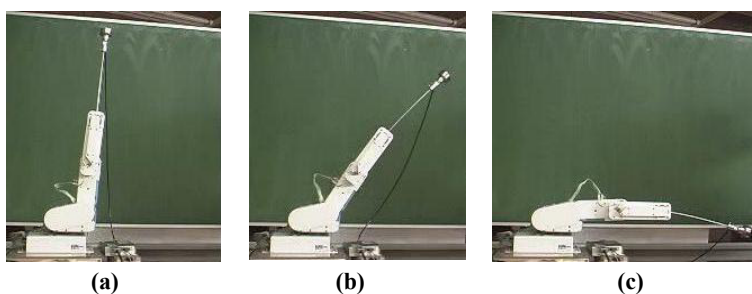


Fig.12 Motion of 3-link manipulator (Case A)



Fig.14 Deformation of the link (Case A)

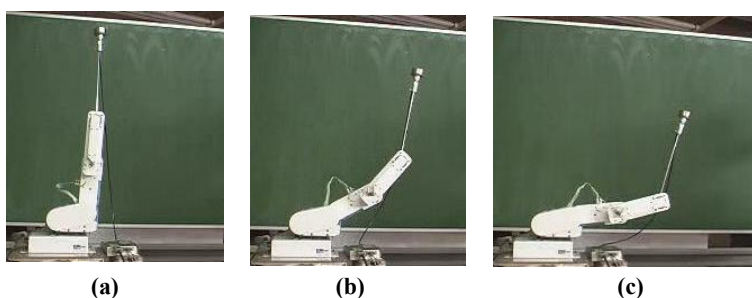


Fig.13 Motion of 3-link manipulator (Case B)



Fig.15 Deformation of the link (Case B)