

構造力学的パラメータの導入による機構の破損回避を

目的としたマニピュレータの動作計画

Motion Planning of Manipulators for Avoiding Structural Failure
by Using Structural Parameters

学 小松 祥人 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Akihito KOMATSU, Graduate School, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki

Daigoro ISOBE, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki

1. はじめに

ロボット機構の軽量化は、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、そのような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点も生じる。福祉関連ロボットや生活支援ロボットなどの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、しかも様々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1つであると考えられる。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⁽¹⁾。これは、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つの構造力学的パラメータに着目し、それらを利用して機構にとって強度的に危険な姿勢を回避する手法である。

本報告では、マニピュレータの動作を3次元に拡張し動作計画法を適用した。さらに、本動作計画アルゴリズムを導入した実機との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

本研究で構築した動作計画アルゴリズムでは、2つの構造力学的パラメータを利用することで、機構にとって強度的に危険な姿勢を回避する。マニピュレータの動作中、部材ごとの局所的な情報である断面力に着目し、部材の降伏危険性を監視する。降伏危険性が判定された場合には、機構の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ことで機構の強度的な危険性を回避し、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。

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。

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

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。

強度的に安全な姿勢の探索には、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。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、機構を構成する部材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、機構の姿勢や付加荷重条件により変化するため、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。

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4自由度を持つ3リンクマニピュレータに対し、Fig.2 で示す目標軌道を与え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。それぞれのモータには十分なトルクが発生していると想定し、関節は剛節とした。姿勢探索においては、先端関節から順(Joint 3 Joint 2 Joint 1 Base Joint)に直接探索法を適用した。構造力学的パラメータは $(k_y, k_u) = (0.8, 0.4)$ と設定した。

Fig.3 に得られた動作計画結果を示す。このタスクでは、軌道の途中で強度的に危険な状態となり、部材の破損を回避するための姿勢変更が行われている。そして、外力による機構への負担を軽減した姿勢をとりながら徐々に目標姿勢に近づいていき、最終的には目標位置に到達する。このように、部材の破損回避を優先しながらも、機構の強度を活用しタスクを遂行する動作が得られた。

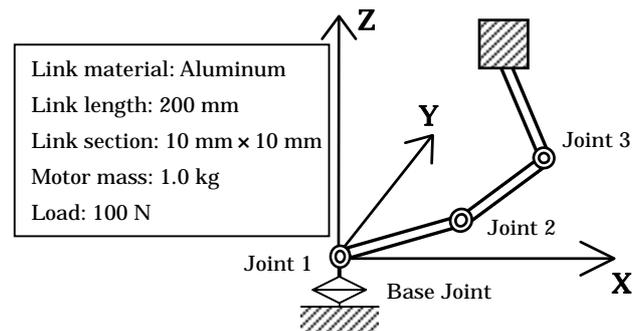


Fig.1 3-link manipulator

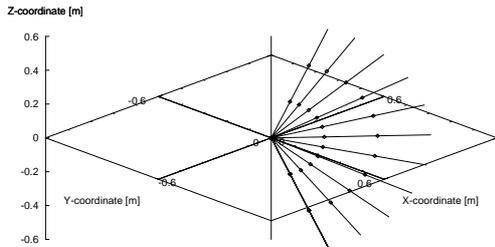


Fig.2 Target trajectory

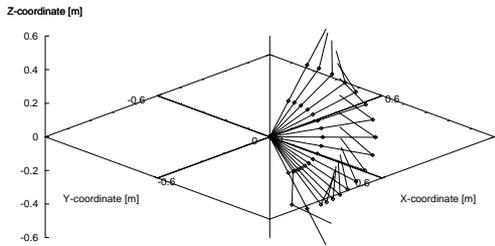


Fig.3 Obtained motion plan

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(BL_AUTOTEC社製ピーエル・NANOセンサ 2.5/2)を Fig.4 のように実機に搭載し, 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. マニピュレータの先端リンクは, 低剛性のアルミニウム製(A1070)の丸棒で, 断面直径 4 mm, リンク長 248 mm である. また, (1) 式中の全断面塑性値を求める際に使用する降伏応力としては, 0.2%耐力値の 31 N/mm² を採用した.

実験では, マニピュレータのリンク先端に 264 g の重りを持たせ, Fig.5 で示すような鉛直面内の軌道を与えた. タスクをそのまま遂行する場合 (Case 1) と, 本手法を適用して機構の破損回避を優先させた場合 (Case 2) とで実験を行い, 動作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) と設定した. Case 1 および Case 2 について (a) (b) (c) の順にマニピュレータが動作していく様子をそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示す. また, 動作後の先端リンク

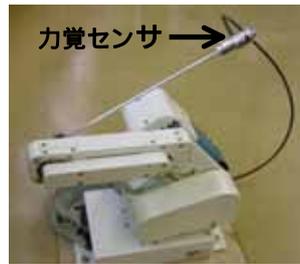


Fig.4 3-link manipulator used in the experiment

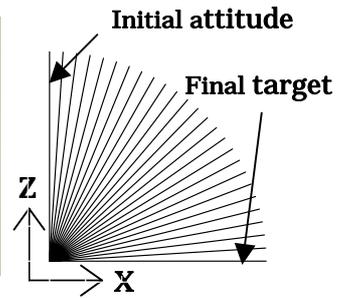


Fig.5 Target trajectory

部材を軸方向から観察した図をそれぞれ Fig.8, Fig.9 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.

実験において, Case 1 では姿勢が水平状態になったとき, 重りの荷重によって先端リンクが大きくたわんでいる様子が確認できる. また Fig.8 に示すように, 使用したリンク部材に永久変形が生じ, その変形量はリンク長に対して 0.56% であった. 一方, 動作計画法を適用した Case 2 では, Fig.7 のように, 荷重に対する負担を軽減するため, 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 Fig.9 のように, 動作後の部材に変形は認められなかった.

5. おわりに

本報告では, 機構の破損回避を優先する動作計画法を 3次元で動作するマニピュレータに対し適用して検証した. その結果, 部材の強度を考慮した動作軌道が得られた. また, 本動作計画法を低剛性のリンク部材を取り付けた実機に適用し動作実験を行ったところ, リンク部材の破損を回避した動作が得られた. 今後は 3次元での動作実験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, (2004), pp.75-82.



(a) (b) (c)
Fig.6 Motion of 3-link manipulator (Case 1)



Fig.8 Deformation of head link member (Case 1)



(a) (b) (c)
Fig.7 Motion of 3-link manipulator (Case 2)



Fig.9 Deformation of head link member (Case 2)