

# ロボットアームの強度的安全性を優先した動作計画

## Motion Planning of Robotic Arms with Structural Safety as Priority

正 小松祥人 (川崎重工業) ○正 磯部大吾郎 (筑波大)

Akihito KOMATSU, Kawasaki Heavy Industries  
Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, isobe@kz.tsukuba.ac.jp

In this paper, a motion-planning scheme that enables manipulators to avoid structural damage is described. By using this scheme, manipulators are encouraged to protect themselves from structural damage by searching for a safer attitude when their structural risk becomes high during their given tasks. The structural risk is determined by using two parameters, the resultant forces and total strain energy stored in the architecture, which are calculated by the finite element method. Some numerical tests are carried out and the proposed strategy is implemented into the interface of a robotic arm to verify its validity. The experimental results revealed the practicability of the scheme in avoiding structural damage during the given tasks.

**Key Words:** Motion Planning, Robotic Arm, Structural Safety, Finite Element Method

### 1. 緒言

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ている。しかしその反面、軽量化によって機構の強度が低下し、破損の危険性が高まるという問題も生じる。特に、現在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のような人間と共存を目指すロボット機構においては、人間に危害を加えないように軽く、しかも様々なタスクが実施可能であることが望まれる。このような汎用的なロボットにおいては、適切な強度設計と共に、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一つであると考えられる。しかし、これまでのロボットの姿勢決定・動作計画に関する研究[1][2]では、タスク遂行を目的としたものが多く、ロボット自身の安全性に関するものは少ない。

そこで、ロボットを構造工学的に捉え、機構の強度を考慮した動作計画法が提案された[3]。これは、有限要素法を用いて機構の強度的危険性を評価し、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という手法である。この手法では、部材に発生する断面力を用いて算出される降伏関数と、機構内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を利用して姿勢変更を行い、機構にとって強度的に危険な姿勢を回避する。

本稿では、提案された動作計画法を実機に適用し、その実用性を確認するために行った検証実験結果について報告する。

### 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、タスク遂行中にロボットアームを構成する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安全な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。

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。

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

ここで $M_x$ 、 $M_y$ および $N$ はそれぞれ、 $x$ 、 $y$ 軸回り曲げモー

メントおよび軸力であり、添字'0'は全断面塑性値を意味する。降伏関数 $f_y$ は $0 < f_y < 1$ の範囲で推移し、 $f_y=1$ となったとき部材の全断面が塑性化すると仮定している。したがって、 $k_y$ 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が、その分、部材強度を活用してタスクを実行できる可能性も高くなる。逆に $k_y$ を低く設定すると、危険性が小さくとも軌道修正が行われるようになる。

強度的な危険性が判定されると、まず臨界ひずみエネルギー $U_c$ を算出する。この臨界ひずみエネルギーは、部材の断面に部材降伏が発生するとき、つまり $f_y=1$ となるときの全ひずみエネルギーの値と定義した。全ひずみエネルギーは、姿勢すなわちロボットの移動量である関節角に依存する多変数関数とみなせるため、各関節に対して1変数極値探索手法の一種である直接探索法を適用して全ひずみエネルギーを抑制した姿勢を探索する。ここで、部材降伏を回避するためには、必ずしも全ひずみエネルギーの値を極小化する必要はなく、これを臨界ひずみエネルギー $U_c$ 以下に低減すれば十分であると考えられる。そこで、次式が満たされるまで全ひずみエネルギーを抑制した姿勢を探索する。

$$U_s < U_c \times k_U \quad (2)$$

ここで、 $U_s$ はステップ $s$ における全ひずみエネルギー値で、 $k_U$  ( $0 < k_U < 1$ )は指定した抑制目標レベルである。なお $U_c$ は、姿勢によって変化するため、姿勢が修正されるたびに再計算する必要がある。

このように本アルゴリズムでは、機構の局所的な情報である断面力を用いて強度的危険性を監視し、危険な姿勢になるたびに、系全体としての負担を軽減するために全ひずみエネルギーを抑制した安全な軌道を模索し、軌道修正が行われる。

### 3. 動作実験

本報告では、ロボットアームに対して実用的なタスクを与え、動作計画法によってどのような動作が得られるか検証実験を行った。図1に示すように、アームに作用する外力を検出するための力覚センサ(BL\_AUTOTEC社製、BL\_NANOセンサ2.5/2)を3リンクロボットアームの先端に取り付けた。さらに、様々な錘を装着可能とするため、センサの先に電磁石(KANETEC社製、KE-1B、最大吸着力8N)を取り付け、動作計画アルゴリズムと実機との間のインターフェースを作成した。アームのモデル化においては、曲げ変形に対して

精度のよい Bernoulli-Euler の仮定に基づく 3 次はり要素を使用した。そして図 2(a)に示すように、初期位置( $X=0.28$  m)から直立した姿勢まで錘を持ち上げるというタスクを与え、動作計画を実施した。実験では 3 種類の錘を使用し、それぞれ Case 1:102 g, Case 2:154 g, Case 3:196 g とした。ただし、動作計画に対して入力する外力は、系の感度を大きくし、実際にアームが破損することを回避するため、得られたセンサ値を 100 倍して使用した。

実験に先立ち、パラメータを  $(k_p, k_i) = (0.8, 0.6)$  と設定し、それぞれのケースについて動作計画を実施したところ、図 2(b), 2(c), 2(d)に示す結果が得られた。これらの図では、動作計画によって修正された軌道を黒線で、修正されなかった軌道を灰色の線で表示している。Case 1 においては、機構に加わる負担が小さかったため強度的な危険性が判定されず、初期に与えた軌道通りタスクが実行された。Case 2 では、機構への負担がやや大きくなり、何度か強度的な危険性が判定されて軌道修正が行われた。しかし、最終的には目標姿勢まで到達し、安全にタスクを実行することができた。一方 Case 3 では、錘が重いために降伏関数  $f_y$  がすぐに危険性判定レベルを超え、姿勢探索が行われたが、安全な姿勢が得られず動作計画が中止された。これは、危険性判定後の姿勢探索において、全ての関節に対して直接探索法を適用しても全ひずみエネルギーを抑制目標値まで低減した姿勢が見つからなかったためである。

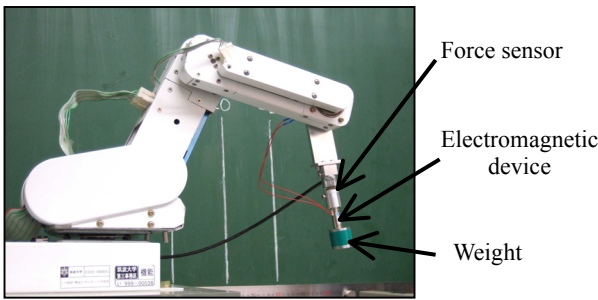


Fig. 1 Three-link robotic arm

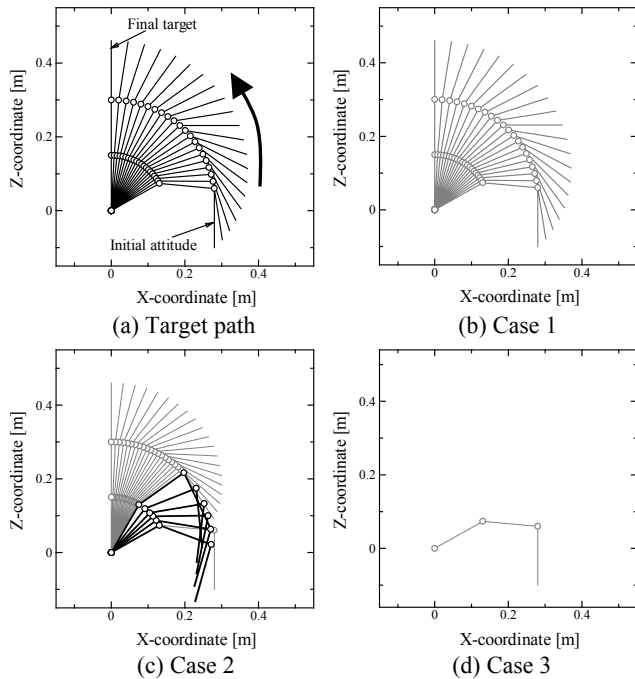


Fig. 2 Target path and obtained motion plans

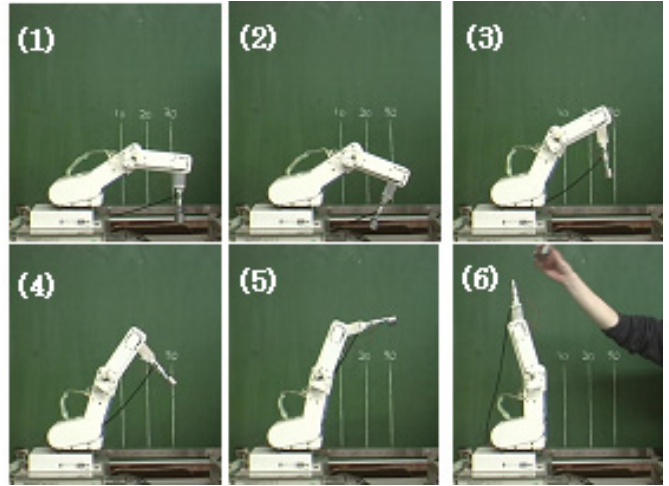


Fig. 3 Motion of robotic arm (Case 2)

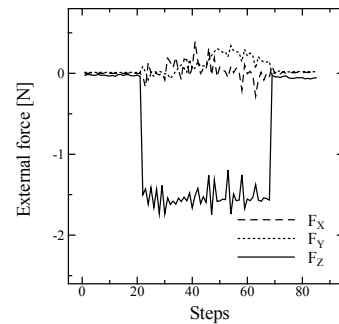


Fig. 4 Histories of external force (Case 2)

動作計画と実機の動作を比較するため、解析と同様のタスクを与え、リアルタイムで動作計画実験を行った。一例として、Case 2 の実験の様子を図 3 に示す。また、実験中に力覚センサで検出された外力値を図 4 に示すが、錘によってアーム先端に作用する外力を精度よく検出していることがわかる。図 3 に示すように、錘を持った直後に強度的危険性が判定され、機構の負担を軽減するために錘を根元方向に引き寄せさせるように姿勢を変化させた。その後は、図 2(c)に示す動作計画と同様に徐々に目標姿勢まで錘を持ち上げた。他のケースについても同様に、動作計画と良好な一致が見られた。

#### 4. 結言

本報告では、ロボット機構の強度的安全性を優先した動作計画法を提案し、実機に導入して検証実験を行った。その結果、必要に応じて姿勢変更を行いながらタスクを実行し、場合によってはタスクを放棄してロボット自身の強度的安全性を優先させるという柔軟な動作が得られた。これらのことから、動作計画法およびシステムの実用性を確認した。

今後の課題としては、動的効果についての検証や、より効率のよい収束計算アルゴリズムの開発などが考えられる。

#### 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] 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一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, 第 22 巻, 第 1 号, pp.75-82, 2004.