

ロボットアームの強度的危険性を回避するための動作計画法 -持ち運び動作への適用例-

○山口良規(筑波大院) 磯部大吾郎(筑波大)

1. 緒言

昨今まで、ロボットが使用される場面としては工場などが多く、人々の生活環境で直接触れ合う機会はほとんどなかった。しかし、今後介護ロボットや生活支援ロボット[1]など、ロボットが我々の生活の一部になることがますます増えてくるであろう。人間の生活環境へロボットを導入する際、安全性の確保が重要である。アシモフは著書[2]の中で「ロボット3原則」を提案している。その第3条に、第1条：人間に危害を及ぼさないこと、第2条：人間の命令に従うこと、に反さない限り自己を守らなければならないとある。第1条および第2条に対応した研究例は数多くあるが、第3条に関する研究はあまり見受けられない。

そこで、軽量化設計された低強度なロボットのタスク実行時の破損を防ぐために、ロボット機構を構造的に捉えてその強度的な危険性を評価し、機構の破損を回避させる動作計画法[3]を提案した。本手法は、有限要素法を用いた構造解析を行い、断面力レベルでの部材の降伏関数値と機構に蓄積される全ひずみエネルギーという2つのパラメータに基づいて姿勢を変更し、機構の強度的な危険性を回避するというものである。

先行研究では、上記2つのパラメータを用いた動作計画法について、ロボットアーム動作時の強度的問題を解決する手段として有効であることが確認されている[4]。しかし、ステップごとに静的に降伏関数値および全ひずみエネルギーを計算するため、慣性力が大きく、本来は危険な状態に達しているような場合でも危険判定がなされなかった。そこで本研究では、この動作計画法に慣性項を導入し、ロボットアームのいくつかの持ち運び動作を例にして検証を行った。動作例では、危険回避のための姿勢変更が実施された場合でもタスクの実行を可能とするために、先端位置制御を行った。

2. 機構の強度を考慮した動作計画法

本節では、ロボットアームの強度的危険性を回避するための動作計画法を構築する上で重要な、軌道計算アルゴリズムおよび降伏関数値と全ひずみエネルギーの算出方法について説明する。

2.1 軌道計算アルゴリズム

本研究で使用する軌道計算アルゴリズムは、有限要素解析で用いられるものをフレキシブルリンク系

の運動学計算に応用したものである。本手法の特長は、運動方程式を増分型で表現することで解を逐次的に求める近似解法となっている点、また、それを能動的に動作する機構に適応させた点である。

機構の動作による慣性力を考慮すると、仮想仕事の原理より時刻 $t+\Delta t$ における増分型運動方程式は次式で定式化される。

$$[M]\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + [M]\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は減衰マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{F\}$ は節点力ベクトル、 $\{R\}$ は要素内力ベクトル、 $\{\ddot{u}_m\}$ はリンクの動作による節点加速度ベクトル、 $\{\ddot{u}_d\}$ はリンクの変形による節点加速度ベクトル、 $\{\dot{u}_d\}$ はリンクの変形による節点速度ベクトル、 $\{\Delta u_d\}$ はリンクの変形量増分ベクトルである。式(1)に Newmark の β 法を適用し節点加速度の総和ベクトルを次式により算出すると、これがアーム動作時の剛性項、減衰項および慣性項を考慮した軌道となる。

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + \{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

2.2 降伏関数値の算出

ロボットを構成する部材の破損回避のために、部材の断面力レベルでの降伏危険性を監視する。各部材の強度的危険性の判定値として以下の降伏関数値を用いる。

$$f_y = \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 \quad (3)$$

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、添字“0”は全断面塑性値を意味する。この値が危険判定値 k_{yc} (0.0~1.0) に達した時、危険が判定されたとみなす。また本研究では、1本のリンク部材を1つの Bernoulli-Eulerはり要素でモデル化している。

2.3 全ひずみエネルギーの算出

機構に外力が作用すると、機構内部にひずみエネルギーが蓄積される。その際に、蓄積されたひずみエネルギーの総和を減少させることで、機構に加わる負担を平均的に軽減することができると考えられる。そこで、機構内部に発生するひずみエネルギーを抑制する姿勢変更アルゴリズムを動作計画法に加えた。ひずみエネルギー U は次式によって数値的に求める。

$$U = \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dV = \sum_i^n \{\epsilon\}_i^T \{\sigma\}_i l_i \quad (4)$$

ここで、 $\{\epsilon\}_i$ は*i*番目の要素のひずみベクトル、 $\{\sigma\}_i$ は断面力ベクトル、 l_i は要素長、 n は総要素数である。

2.4 構造力学的パラメータを用いた姿勢変更

2.2, 2.3節で示した構造力学的パラメータを用いたロボットアームの姿勢変更について説明する。

本手法では、機構の局所的な危険性については、降伏関数値を用い監視する。ロボットアームの動作中、降伏関数値が設定した危険判定値に達すると、全ひずみエネルギーを減少させるように直接探索法を用いて姿勢変更を行う。姿勢変更時の初期方向は、降伏関数値をより減少させる方向とする。ロボットアーム機構内に蓄積された負担を軽減させるため、危険判定時の全ひずみエネルギーの何%かを抑制目標値として設定し、その値を下回った場合、本来のタスクに戻る。

このように、ロボットアーム機構の局所的な情報である降伏関数値によって強度的な危険性を監視し、危険性が判定されたならば、系の全体的な情報である全ひずみエネルギーを抑制させる。

3. 解析例

本節では、前節で示した動作計画法を用い、先端位置を任意の位置に運ぶタスクを実行中に、ロボットアームが強度的危険性を回避しながら動作を行うことを確認、検証した。ここでは、動作の例を2つ示す。

3.1 持ち上げ動作の解析例

図1に示すように先端位置を(0.2, -0.4)の位置から(0.0, 0.6)の位置まで運ぶ動作をタスクとした。危険回避動作により、ロボットアームの軌道が当初の軌道から変わった場合でも、必要な関節の回転角を計算しタスクを実行できるように制御を行った。

本解析で用いたロボットアームの仕様を表1に示す。ロボットアームの第1関節に2kg、第2関節に1kgのモータを配置し、ロボットアーム先端には200gのおもりを取り付けた。また、危険判定値 $k_{yc}=1.5 \times 10^{-5}$

とし、抑制目標値を危険判定時の60%とした。

以上の内容で動作計画を行った結果、ロボットアームの軌道が図2、降伏関数値の推移、全ひずみエネルギーの推移が図3、図4となった。まず、初期位置から目標位置までロボットアームを円弧状に動作させると、先端と第1関節との間の距離が長くなり、第1関節の曲げモーメントが増加するため、降伏関数値が増加する。これにより、図3に示すように降伏関数値が危険判定値 k_{yc} に達するため、図2に示すように先端側のリンクから内側に曲げることで降伏関数値を減少させ、強度的危険性を回避していることが確認できる。その後、図4に示すように、全ひずみエネルギーが抑制目標値まで減少すると、目標姿勢へ向かう動作へと戻る。また、危険判定値や抑制目標値を変更すると、異なった軌道となった。例えば危険判定値を $k_{yc}=1.3 \times 10^{-5}$ より小さくすると、タスクを達成できなくなる。また、抑制目標値を50%としても、抑制が困難となり目標達成に至らない。今回のタスクでは、可能な限り抑制目標値を小さくすると、ロボットアームの軌道は、アームをより内側に曲げる軌道となった。

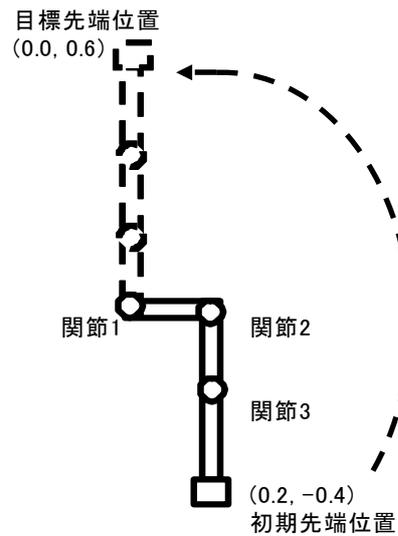


図1 ロボットアームのタスク

表1 ロボットアームの仕様

	リンク1	リンク2	リンク3
材質	アルミニウム	アルミニウム	アルミニウム
リンク長[m]	0.2	0.2	0.2
断面形	中空長方形	中空長方形	長方形
断面積[m ²]	4.64×10^{-8}	3.04×10^{-8}	2.4×10^{-8}
断面2次モーメント[m ⁴]	1.88×10^{-7}	1.06×10^{-7}	3.21×10^{-6}
塑性断面係数[m ³]	1.01×10^{-5}	5.25×10^{-6}	2.40×10^{-6}

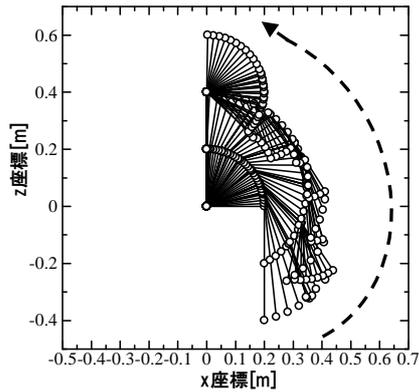


図 2 ロボットアームの軌道

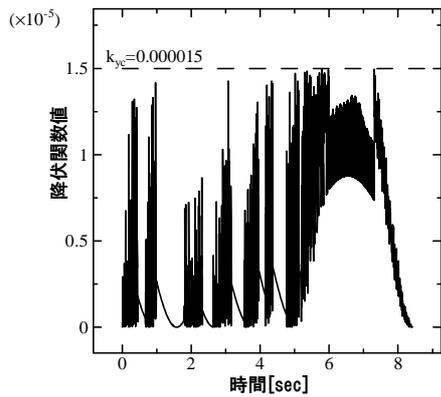


図 3 降伏関数値の推移

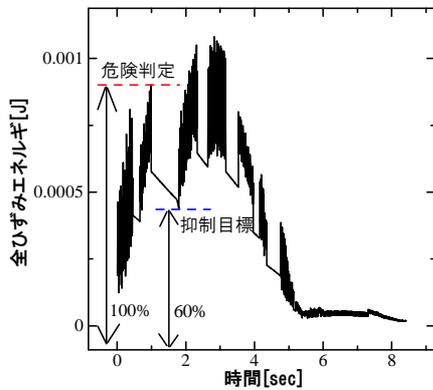


図 4 全ひずみエネルギーの推移

3.2 水平持ち運び動作の解析例

次に、図 5 に示すようにロボットアームの先端位置を座標(-0.4, 0.2)から(0.3, 0.0)へ運ぶ動作をタスクとし、動作計画法の検証を行った。用いたロボットアームの仕様を表 2 に示す。第 1 関節に 2kg、第 2 関節には 1kg のモータを配置し、先端には 1.5kg のおもりを加えた。また、危険判定値 $k_{yc}=0.02$ 、抑制目標値を危険判定時の 70% とし解析を行った。その結果、ロボットアームの軌道が図 6、降伏関数値、全ひずみエネルギーが図 7、図 8 となった。

タスクの初期状態では、先端が第 1 関節から離れ

た位置であるため曲げモーメントが大きく、すでに降伏関数値が危険判定値に達しており、直ちに危険回避動作が行われた。その際、前節のようにロボットアームを内側に引き寄せる動作ではなく、アームを地面と垂直状態にする動作をとった。曲げモーメントを直ちに減少できる姿勢が地面と垂直状態であったためこのような動作になったと考えられる。一般に、曲げ剛性ではなく軸剛性に負担を掛ける方が降伏関数値は減少する。その後、危険判定値を越えないようにアームを内側に曲げ、先端位置を目標位置に到達させることに成功した。しかし、危険判定値を今回設定した $k_{yc}=0.02$ より小さくするとタスクを達成できなかった。このタスクでは、アームが地面と垂直な状態を超え斜めになるまで姿勢変更をすると、再び曲げモーメントが大きくなり降伏関数値が増加してしまうため、今回の軌道が降伏関数値を最小とする姿勢であったものと思われる。

表 2 ロボットアームの仕様

材料	アルミニウム
断面積[m ²]	1.0×10 ⁻⁴
断面2次モーメント[m ⁴]	8.3×10 ⁻¹⁰
塑性断面係数[m ³]	2.5×10 ⁻⁷

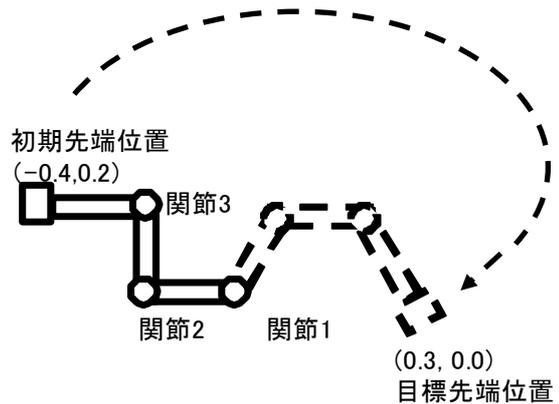


図 5 ロボットアームのタスク

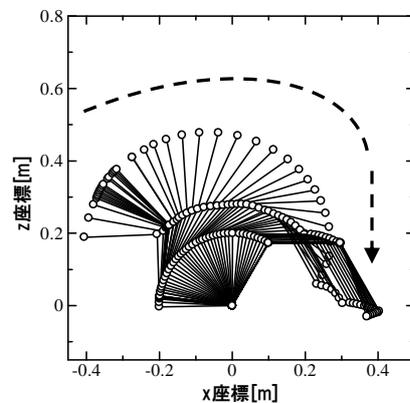


図 6 ロボットアームの軌道

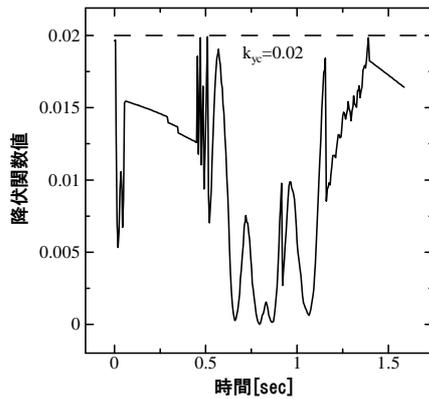


図7 降伏関数値の推移

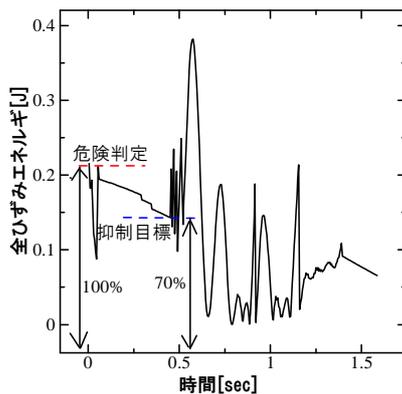


図8 全ひずみエネルギーの推移

4. まとめ

本研究では、2つの構造力学的パラメータを強度的な危険性の指標として用い、危険判定がなされた場合、全ひずみエネルギーを減少させる方向へロボットアームを動作させると、機構の強度的な危険性を回避できることが確認された。抑制パラメータとして全ひずみエネルギーを用いることにより、消費エネルギーなどの観点から、より効率的な動作になると考えられる。

先端位置を目標位置に運ぶタスクを実行する場合においても、強度的に負担の少ない経路を探索し、危険性の低い軌道を通り、可能な限りタスクを達成させる動作を実現することが確認できた。危険回避動作を行った場合、最短距離で目標座標に向かう場合よりも動作量が増えてしまうが、ロボットアーム機構には負担が少ない軌道であるため、モータに必要なトルクを減少させ、より省コストな動作となることが考えられる。

参考文献

- [1] 生田幸士, 野方誠, “福祉ロボットの安全性に関する統一的评价法の提案 - 危険性の定量化による安全設計対策の評価 -”, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 3, pp.363-370, 1999.

- [2] Isaac Asimov(著), 小尾芙美(訳): “われはロボット”, 早川書房, 1983.
- [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.363-371, 2004.
- [4] D. Isobe, A. Komatsu, “Motion planning of manipulators regarding structural safety as a prior condition” Advanced Robotics, vol. 21, no. 5-6, pp.533-554, 2007.