



作業達成確率によるロボットアームの信頼性評価*

琴坂信哉** 高田祥三*** 幸田武久† 浅間 一††
平岡弘之††† 松元明弘‡ 遠藤 勲‡‡‡

Reliability Evaluation of Manipulators by Means of Probability of Task Achievement

Shin'ya KOTOSAKA, SHOZO TAKATA, Takehisa KOHDA, Hajime ASAMA,
Hiroyuki HIRAOKA, Akihiro MATSUMOTO and Isao ENDO

This paper represents a new method for evaluating reliability of manipulators by means of probability of task achievement. Since, articulated manipulators have functional redundancies depending on assigned tasks, they may be able to achieve the task even with faulty joints. In the proposed method, reliability is evaluated taking this feature into account. First, the assigned task is resolved into task steps. Success conditions for achieving each step are obtained based on a manipulator model, which is represented in terms of DH parameters. Next, a success condition of whole task is computed from those of task steps. Finally, the probability of task achievement is evaluated by specifying failure rates of joints in the success condition of whole task. An illustrative example shows the evaluation of a seven DOF manipulator applied to an inspection task.

Key words: robot manipulator, mission reliability, functional redundancy, task oriented evaluation

1. はじめに

近年、作業の信頼性向上や、作業員の安全性確保といった観点から、原子力プラント等での保全作業をロボット化することが検討されるようになってきた。しかしながら、このようなプラントで作業を行う保全ロボットには、作業および作業環境の性質上、高い信頼性が要求される。そのため、信頼性評価は保全ロボットの設計あるいは運用時に欠かすことのできない技術である。従来から、ロボットのハードウェアの信頼性評価として数多くの研究がなされてきた¹⁾。

ところで、ロボットアームは、作業を遂行する上で、様々な作業を実行できるという柔軟性を持っている。したがって、ロボット自身が健全であることと与えられた作業を達成できることは必ずしも同一とはならない。このため、作業の達成という観点からロボットの信頼性を考えた場合は、作業内容に応じて、ロボットの持つ機能の冗長性を考慮した評価を行う必要がある。しかし、この観点からの研究は、ほとんどなされていないのが現状である。

本研究では、作業をいくつかのフェーズに分解し、それぞれのフェーズの達成条件から全体の作業達成条件を求めることを考える。いま、ロボットアームの状態を、個々の関節が“正常”か、“故障”かによって表すとす。一般には作業の進行と内容に応じて、その達成に必要な関節が変化する。したがって、各フェーズで必要とされる関節が正常であることがそのフェーズの達成条件となり、これらの条件を時間的順序関係を考慮して統合することによって全体の作業達成条件が求められる。

従来、信頼性評価の手法としては、FTA²⁾などが知られて

いる。しかし、これらの手法では、評価対象機器の作業達成条件の導出を、人間の専門家が行わなければならない。しかし、設備機器や作業が複雑になるにつれ作業量が膨大になり、また、見落としや、誤り、個人による差異の発生などの可能性もでてくる。また、FTAでは、作業の進行に伴う作業達成条件の変化を扱うのが困難である。

作業達成条件の時間的順序関係が考慮された方法としては、PMA (Phased Mission Analysis)³⁾と呼ばれる手法が提案されている。しかし、この手法でも、個々の作業達成条件を人手によって求める必要があるため、作業内容に応じて機器の作業達成条件が変化する場合を取り扱うには困難がある。

本報告では、上記の問題点を解決する手法として、ロボットアームを対象に、その機構モデルを用いて個々の作業に対してその達成条件を自動的に算出し、それに基づきロボットアームの信頼性評価を行う手法を提案する⁴⁾。

2. 機構モデルを用いたロボットアームの信頼性評価

ロボットアームの関節の故障が独立であると仮定すれば、一部の関節の故障によってロボットアームの全体の動作が停止してしまうことはない。その状態で、ロボットアームが与えられた作業を達成することができるかどうかは、与えられた作業と残存する関節に依存する。本論文では、作業中の各時点において動作可能であることが要求される関節の組合せを作業達成条件と呼ぶことにする。

本手法では、ロボットアームのモデルを計算機上に構築し、そのモデルと作業内容からロボットアームの作業達成条件を導出し、関節の故障率からロボットアームの作業達成確率の評価を行う。

作業内容は、手先軌道上の経由点を用いて表現する。これらの点は、ロボットアームの手先がとるべき位置と姿勢のデータから構成される。以降、これらの点を作業目標点と呼ぶ。この作業目標点 P_{i-1} から P_i ($i=1, \dots, n$) までの手先の移動を作業フェーズ i と呼ぶ。また、作業フェーズ i は、時刻 t_{i-1} に開始され、時刻 t_i に終了する。作業は、1, 2, ..., n 番目の各作業

* 原稿受付 平成6年7月28日
** 学生会員 埼玉大学大学院 (湘和市下大久保 255)
*** 正会員 早稲田大学理工学部 (東京都新宿区大久保 3-4-1)
† 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)
†† 正会員 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)
††† 正会員 中央大学理工学部 (東京都文京区春日 1-13-27)
‡ 正会員 東洋大学工学部 (川越市鯉井 2100)
‡‡‡ 理化学研究所

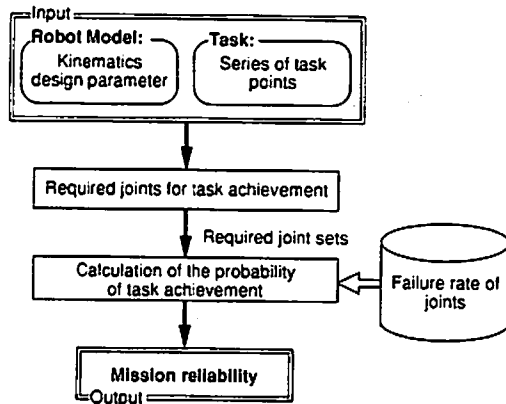


Fig. 1 Procedure for the reliability evaluation

フェーズが順に達成されることによって成功したと評価する。ロボットアームの記述方法には、マニピュレータをリンク座標系間の相対関係を用いて記述するDH記法を用いる。

まず、信頼性評価の対象であるロボットアームを評価するにあたって次のような前提条件を置く。

- (1) 故障は、ロボットアームの関節単位で独立に発生し、また、最後に保全を行ってから以降の故障密度関数は、同定されているものとする。
- (2) 与えられた作業目標点 P_{i-1} と P_i の間を結ぶ手先軌道を作り出すために必要な関節が、その作業フェーズ期間中正常に作動する場合に作業フェーズ i が達成される。一般にロボットアームは、ある手先位置、姿勢に対して、それを実現できる関節角の値、つまり逆運動学解を複数持ち得る。ここでは、この解の種類は全作業フェーズを通じて変化しないと仮定する。
- (3) 関節の故障モードには、関節固着を仮定する。ロボットアームは、作業遂行の信頼性を高めるため、一部の関節が動作不能に陥っても、故障関節を電磁ブレーキ等で固定し、残りの関節によって動作を実行できる能力を持っていることを想定する。

図1に本信頼性評価手法の評価の流れを示す。まず、作業目標点とロボットアームの機構モデルが入力される。これらのデータに基づき、各作業フェーズごとに作業を実行するために必要な関節を算出する。これから、作業全体の達成条件を求め、さらに関節の故障率から作業達成確率を計算する。

関節の故障が発生する確率の評価には、ロボットアームの関節の稼働状態を、停止状態と動作状態に区別して評価する。動作状態とは、関節が手先移動のため回転もしくは直動動作を行っている状態を指し、停止状態とは、現在の関節角を維持するだけの機能を果たしている状態を指す。これらの稼働状態の区別を行うのは、劣化の進行は関節の稼働状態によって変化すると考えられるからである。そこで、動作状態と停止状態では別々の故障率を持つとして、それぞれの稼働状態に応じた故障分布関数を定義することにした。

3. 信頼性評価手法

3.1 作業達成に必要な関節の導出

図2に示す7関節のシリアルリンクマニピュレータ機構を用いて図3に示す作業を行った場合を例として、作業に必要な関節の導出手順を説明する。この作業は、超音波探傷を想定した検査作業である。ロボットアームは、手元にあるプローブをと

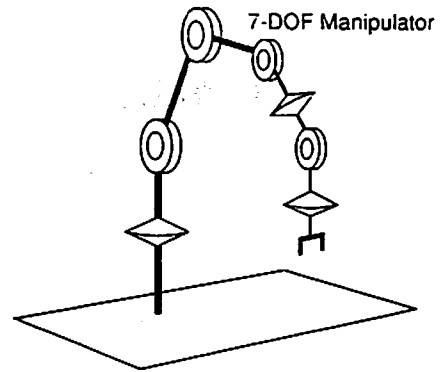


Fig. 2 An example of a robot configuration

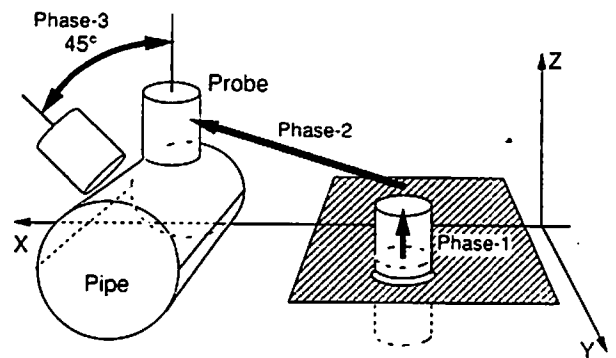


Fig. 3 An example of an inspection task

りあげ、検査対象であるパイプ上面まで持っていき、パイプ面に沿って掃引する。ロボットアームの手先が、プローブをつかんだ状態を初期位置とし、作業目標点 P_0 とする。この作業は、3段階の作業フェーズから構成される。プローブを持ち上げるフェーズ1、プローブをパイプ上面まで移動させるフェーズ2、プローブでパイプ表面を掃引するフェーズ3である。

最初に、フェーズ1について作業達成に必要な関節の導出を行う。基本的には、なるべく少ない数の関節で作業が行える方が信頼性の観点から有利であるので、作業フェーズごとに作業遂行に必要な関節の最小组合せを求める。この過程を図4に示す。まず、すべての関節を用いて作業フェーズを実行することができるかどうかを評価する。もし、実行可能な場合は、任意の1関節を固定した6関節機構を生成する。例題では、どの関節を固定するかで7種類の6関節機構の関節組合せが生成される。この6関節機構それぞれについてフェーズ1が実行できるかどうかを評価する。作業が実行可能な関節組合せが存在する場合は、その関節組合せに対して、再度1関節を固定した5関節機構を生成する。そして、再び各々の関節組合せに対してフェーズ1が実行できるかどうかを評価する。これを繰り返すことにより、最終的にこの作業フェーズを実行できる最小関節数の関節組合せが算出される。例題のフェーズ1においては、第2, 3, 6関節もしくは第2, 4, 6関節となる。以降この作業実行可能な関節の組合せを、 ϕ_i と表記する。 i はフェーズを表し、 j はそのフェーズに対する関節の組合せの通し番号である。例えば、フェーズ1においては、作業実行に必要な最小関節数の関節組合せは、 $\phi_{11} = \{J_2, J_3, J_6\}$ 、 $\phi_{12} = \{J_2, J_4, J_6\}$ である。 J_k は、 k 番目の関節を表す。

以上の操作を各作業フェーズにわたって繰り返すことにより、各作業フェーズごとに作業を実行できる最小関節数の関節組合せの集合を求める。例題の検査作業における結果を表1に

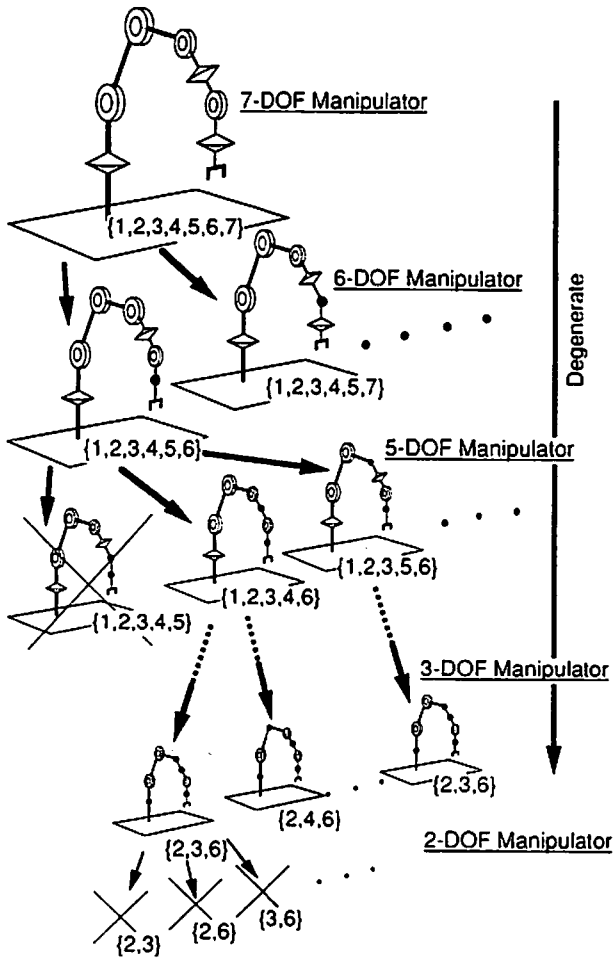


Fig. 4 An example of a tree of degenerate manipulator

Table 1 Required joints for each task phase

Phase-1	Phase-2	Phase-3
$\phi_{11}=\{J_2, J_3, J_6\}$	$\phi_{21}=\{J_1, J_3, J_4, J_6, J_7\}$	$\phi_{31}=\{J_2, J_3, J_6\}$
	$\phi_{22}=\{J_1, J_2, J_4, J_6, J_7\}$	$\phi_{32}=\{J_2, J_3, J_6\}$
	$\phi_{23}=\{J_1, J_2, J_3, J_4, J_6, J_7\}$	$\phi_{33}=\{J_2, J_3, J_4, J_6\}$
	$\phi_{24}=\{J_1, J_2, J_3, J_4, J_7\}$	$\phi_{34}=\{J_2, J_4, J_6\}$
$\phi_{12}=\{J_2, J_4, J_6\}$	$\phi_{25}=\{J_1, J_3, J_4, J_6, J_7\}$	$\phi_{35}=\{J_2, J_3, J_6\}$
	$\phi_{26}=\{J_1, J_2, J_4, J_6, J_7\}$	$\phi_{36}=\{J_2, J_3, J_6\}$
	$\phi_{27}=\{J_1, J_2, J_3, J_6, J_7\}$	$\phi_{37}=\{J_2, J_4, J_6\}$
	$\phi_{28}=\{J_1, J_2, J_3, J_4, J_7\}$	$\phi_{38}=\{J_2, J_4, J_6\}$

Time t_0 t_1 t_2 t_3

J_k : the k-th joint of the manipulator

示す。

一般的には、各フェーズで作業遂行に必要な最小関節数の関節組合せの集合には、複数の関節組合せが含まれる。そして、どの関節組合せを用いることができるかは、その前の作業フェーズで用いられた関節組合せに依存する。この関係は、表1において矢印で示されている。例えば、フェーズ1では、表1に示すように2通りの組合せが生成される。フェーズ2においては、この2通りの関節組合せを用いて作業フェーズ1を行ったときの関節角の最終値を初期値として、それぞれに対して作業に必要な関節の算出を行う。

これらの結果から、作業全体を実行するために必要な関節の組合せの系列を求める。この関節組合せの系列を $\Omega_h = \{\phi_1^h,$

Table 2 Series of joint sets which are indispensable for the completion of the task

Ω_1	$\{\phi_{11}, \phi_{21}, \phi_{31}\}$
Ω_2	$\{\phi_{11}, \phi_{22}, \phi_{32}\}$
Ω_3	$\{\phi_{11}, \phi_{23}, \phi_{33}\}$
Ω_4	$\{\phi_{11}, \phi_{24}, \phi_{34}\}$
Ω_5	$\{\phi_{12}, \phi_{25}, \phi_{35}\}$
Ω_6	$\{\phi_{12}, \phi_{26}, \phi_{36}\}$
Ω_7	$\{\phi_{12}, \phi_{27}, \phi_{37}\}$
Ω_8	$\{\phi_{12}, \phi_{28}, \phi_{38}\}$

$\phi_2^h, \dots, \phi_n^h$) ($h=1, \dots, m$) と表現する。 h は、作業全体を実行できる作業系列の通し番号である。ここで、 ϕ_i^h は、フェーズ i において作業系列 h に必要とされる関節組合せを示す。この Ω_h 表記にした作業実行可能な関節組合せの系列を表2に示す。例えば1番目の系列では、 $\Omega_1 = \{\phi_1^1, \phi_2^1, \phi_3^1\} = \{\phi_{11}, \phi_{21}, \phi_{31}\}$ となる。

一般に、ある作業に対して冗長性を持つ機構では、作業フェーズ終了時の関節角を一意に定めることができない。そこで、本手法では、 ϕ_{ij} を求めるにあたって、最小関節数の関節組合せを求めることとし、機構が作業に対して冗長性を持っていた場合でも、冗長解を採用しないこととした。ただし、冗長性を利用しない限り作業が達成できない場合がある。その場合にのみ、その冗長機構を作業達成可能な関節組合せとして採用する。その作業フェーズにおける関節角の最終値は、初期姿勢から目標姿勢までの関節角変位量のノルムが最小となる関節角変位を用いて算出する。図2に示した例題では、 ϕ_{33} の関節組合せが冗長性を利用することによってのみ作業フェーズ3を達成可能であるため、冗長解を採用している。

3.2 作業達成確率の導出

Kohda & Inoue の論文⁵⁾を参考に、作業達成確率の評価方法を以下に示す。ここで、作業実行中には、各要素に対して修理が行われないことを仮定する。

まず、関節 k に対する故障条件を次のように定義する。

$$F^k(t, t' | \Omega_k) \equiv \begin{cases} 1, & \text{稼働条件 } \Omega_k \text{ の下で要素 } k \text{ が、時刻 } t \text{ から } t' \text{ までに故障する場合} \\ 0, & \text{そうでない場合} \end{cases} \quad (1)$$

Ω_k は関節の稼働条件、つまり作業達成に必要な関節組合せの系列を表す。これにより関節が、いつ動作状態にあり、いつ停止状態にあるかが指定される。式(1)は、故障のメカニズムから考えると以下のような特徴を持つ。

- もし、 $t > t'$ なら、 $F^k(t, t' | \Omega_k) = 0$
- $F^k(t_1, t'_1 | \Omega_{k1}) \wedge F^k(t_2, t'_2 | \Omega_{k2}) = F^k(\max(t_1, t_2), \min(t'_1, t'_2) | \Omega_{k1} \cup \Omega_{k2})$

ただし、記号 \wedge は論理的 AND 結合を表す。

特徴1)は、時間の順序関係から明らかである。特徴2)は、2つの故障条件の AND 結合は、1つの故障条件で表現できることを示している。この時、その稼働条件は2つの故障条件における稼働条件の和集合となる。つまり、両者の作業達成に必要な関節組合せの和集合として表現できる。ここで、関節 k が最後の保全完了時刻から t' まで正常であることは t' 以後に故障することに等価である。また作業フェーズ i は、 t_{i-1} に始まり、 t_i に終わることから、作業フェーズ i で関節 k が正常である条件は、 $F^k(t_i, \infty | \Omega_k)$ で表すことができる。よって、作業全体の達成条件として関節の組合せの系列 h を考えたとき、

その系列 k における作業フェーズ i の達成条件 S_i^k は、式 (2) のように表される。

$$S_i^k = \bigwedge_{k \in \Phi_i^k} F^k(t_i, \infty | \Omega_k) \quad (2)$$

論理的 AND は、関節組合せに含まれるすべての関節が作業フェーズ i の完了まで正常であることを表している。

全作業は作業フェーズの連結で表現されることから、作業達成条件は、各作業フェーズの達成条件の論理的 AND 結合により得られる。ゆえにすべての作業フェーズの関節組合せ系列 k に対する作業達成条件 S^k は、式 (3) のように書き表せる。

$$S^k = \bigwedge_{i=1}^n \left(\bigwedge_{k \in \Phi_i^k} F^k(t_i, \infty | \Omega_k) \right) \quad (3)$$

ここで、式 (3) は、故障条件 $F^k(t, t' | \Omega_k)$ の性質を用いて各関節ごとの故障条件の論理的 AND 結合に簡単化することができる。ここで T^k を、一連の作業フェーズの中で関節 k を用いる必要のある最後の作業フェーズの終了時間とする。この T^k は、式 (3) に先ほど述べた故障条件の性質を用いることによって得られる。これを用いて稼働条件 Ω_k の下での作業達成条件 S^k による作業達成確率 $Pr\{S^k | \Omega_k\}$ は、式 (4) のように表現できる。

$$Pr\{S^k | \Omega_k\} = \prod_{k \in \Omega_k} Pr\{F^k(T^k, \infty | \Omega_k) = 1\} \quad (4)$$

Kohda & Inoue の論文⁵⁾では、同じ稼働条件の下でのすべての作業達成条件を考慮した作業達成確率 $Pr\{S\} = Pr\{S^1 \cup S^2 \cup \dots \cup S^n\}$ を Inclusion-Exclusion 法を用いて求めている。しかし、3.1 節でも述べたように、ロボットの関節の組合せの系列 Ω_k を考慮すると、各作業フェーズの終了時の関節状態によって、以降の作業において使用できる関節が異なり、稼働条件に応じて作業達成条件も異なる。そのため、ロボットアームの作業達成条件の導出には、同法を適用することができない。そこで、本手法では作業達成に必要な関節組合せの系列 Ω_k ごとに、 $Pr\{S^k | \Omega_k\}$ を求め、それらの中の最大値を作業達成確率の代表値とする。

3.3 各要素条件の作業達成確率の計算

ここで、作業開始以前に関節 k の保全が完了した時刻を t_M^k とし、作業開始後各関節に対して修理は行われないとすると、作業フェーズ i で関節 k が正常である条件 $F^k(t_i, \infty | \Omega_k) = 1$ の生起確率は、

$$Pr\{F^k(t_i, \infty | \Omega_k) = 1\} = 1 - Q^k(t_i - t_M^k | \Omega_k) \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 $Q^k(t | \Omega_k)$ は稼働条件 Ω_k の下での要素 k の保全完了後 t 時間後における累積故障確率を表す。式 (5) では要素の故障確率に対して特定の分布を仮定していない。そこで、適当な故障分布を仮定することによって式 (5) を用いて作業達成確率を計算することができる。

例えば、関節 k の故障率が、動作時は故障率 λa^k 、停止時は故障率 λs^k の指数分布に従うと仮定する。最終保全時刻 t_M^k から t_i までの関節の停止時間の総和を τ_{si} 、動作時間の総和を τ_{ai} とおくと、作業系列 k に対して作業フェーズ i で関節 k が正常である条件 $F^k(t_i, \infty | \Omega_k) = 1$ の発生確率は、式 (6) のようになる。

$$Pr\{F^k(t_i, \infty | \Omega_k) = 1\} = \exp(-\lambda a^k \tau_{ai}) * \exp(-\lambda s^k \tau_{si}) \quad (6)$$

4. 評価例

第 3 章で述べた図 2, 3 に示す機構と作業を例に本手法を用い

た評価結果を示す。表 2 に示したように、すべての作業フェーズを実行できる関節組合せの系列 Ω_k が 8 通り求められる。

ここで作業時間を、フェーズ 1, 2 を 1 秒、フェーズ 3 を 4 秒とする。また、関節の動作時の故障率を 1/100 (failure/hour)、停止時の故障率を 1/1 000 (failure/hour) とする。そして、ロボットアームの最後に行った保全時刻と作業開始時刻とが同じと仮定して、 $t_M^k = t_0$ とおき式 (4)、式 (6) を用いて各作業系列の作業達成確率 Pr を計算する。まず、作業達成条件 S^1 を求めると

$$\begin{aligned} S^1 &= F^2(t_1, \infty | \Omega_1) \wedge F^3(t_1, \infty | \Omega_1) \wedge F^6(t_1, \infty | \Omega_1) \wedge \\ &F^1(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge F^3(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge F^4(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge \\ &F^6(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge F^7(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge \\ &F^2(t_3, \infty | \Omega_1) \wedge F^3(t_3, \infty | \Omega_1) \wedge F^6(t_3, \infty | \Omega_1) \\ &= F^1(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge F^2(t_3, \infty | \Omega_1) \wedge F^3(t_3, \infty | \Omega_1) \wedge \\ &F^4(t_2, \infty | \Omega_1) \wedge F^6(t_3, \infty | \Omega_1) \wedge F^7(t_2, \infty | \Omega_1) \end{aligned}$$

ゆえに、関節組合せ系列 Ω_1 の時の作業達成確率は、

$$\begin{aligned} Pr\{S^1 | \Omega_1\} &= Pr\{F^1(t_2, \infty | \Omega_1) = 1\} * Pr\{F^2(t_3, \infty | \Omega_1) = 1\} * \\ &Pr\{F^3(t_3, \infty | \Omega_1) = 1\} * Pr\{F^4(t_2, \infty | \Omega_1) = 1\} * \\ &Pr\{F^6(t_3, \infty | \Omega_1) = 1\} * Pr\{F^7(t_2, \infty | \Omega_1) = 1\} \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

となる。

作業達成確率 $Pr\{F^k(t_i, \infty | \Omega_k) = 1\}$ は、関節番号 k 、関節 k を必要とした最後の作業フェーズ i 、そして関節の組合せ系列 h を用いて表現することができる。そこで、式を簡略化するため作業達成確率を $f_{pr}(k, i, h)$ と表現すると、それぞれの作業系列における作業達成確率は次のように表現される。

$$\begin{aligned} Pr\{S^2 | \Omega_2\} &= f_{pr}(1, 2, 2) * f_{pr}(2, 3, 2) * f_{pr}(3, 3, 2) * \\ &f_{pr}(4, 2, 2) * f_{pr}(6, 3, 2) * f_{pr}(7, 2, 2) \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr\{S^3 | \Omega_3\} &= f_{pr}(1, 2, 3) * f_{pr}(2, 3, 3) * f_{pr}(3, 3, 3) * \\ &f_{pr}(4, 3, 3) * f_{pr}(6, 3, 3) * f_{pr}(7, 2, 3) \\ &= 0.999 934 7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr\{S^4 | \Omega_4\} &= f_{pr}(1, 2, 4) * f_{pr}(2, 3, 4) * f_{pr}(3, 3, 4) * \\ &f_{pr}(4, 2, 4) * f_{pr}(6, 3, 4) * f_{pr}(7, 2, 4) \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr\{S^5 | \Omega_5\} &= f_{pr}(1, 2, 5) * f_{pr}(2, 3, 5) * f_{pr}(3, 3, 5) * \\ &f_{pr}(4, 2, 5) * f_{pr}(6, 3, 5) * f_{pr}(7, 2, 5) \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr\{S^6 | \Omega_6\} &= f_{pr}(1, 2, 6) * f_{pr}(2, 3, 6) * f_{pr}(3, 3, 6) * \\ &f_{pr}(4, 2, 6) * f_{pr}(6, 3, 6) * f_{pr}(7, 2, 6) \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr\{S^7 | \Omega_7\} &= f_{pr}(1, 2, 6) * f_{pr}(2, 3, 6) * f_{pr}(3, 2, 6) * \\ &f_{pr}(4, 3, 6) * f_{pr}(6, 3, 6) * f_{pr}(7, 2, 6) \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr\{S^8 | \Omega_8\} &= f_{pr}(1, 2, 8) * f_{pr}(2, 3, 8) * f_{pr}(3, 2, 8) * \\ &f_{pr}(4, 3, 8) * f_{pr}(6, 3, 8) * f_{pr}(7, 2, 8) \\ &= 0.999 943 3 \end{aligned}$$

以上の計算結果からわかるように、作業系列によって作業達成確率が異なる。本手法では、作業系列中最大の作業達成確率をもって、評価対象のロボットアームの作業達成確率の代表値として採用している。よって、この例では、 $Pr = 0.999 943 3$ が評価対象ロボットアームの作業達成確率の代表値となる。

5. 考察

作業内容にかかわらず、すべての関節が作業終了まで、常に

動作状態であると仮定して、故障率 λa^k を用いて作業達成確率 P_s を求めると、

$$P_s = 0.9999000$$

となる。本論文で提案した手法により計算された作業達成確率と比べて低い作業達成確率となっている。これは、本手法がロボットアームの持つ作業に対する柔軟性を有効に評価していることを示している。

今回示した例では、各関節の故障率を一律に一定としたが、一般的には、関節の負荷や使用状況などは同じではなく、また、根本側と手先側で同じ仕様の関節が使われることも少ないと考えられることから、各関節の故障率は同じにはならない。

また、今回は、関節の稼働状態を動作状態と停止状態の2種類に分類したが、本手法では作業達成確率の計算において、さらに細かく稼働状態を区別して評価することも可能である。

また、本手法では、 ϕ_{ij} を算出する際に、原則として作業に対して冗長な機構となる関節組合せは取り除いている。そのため、すべての作業達成可能な関節組合せを求めていることにはならない。例えば、機構の冗長解を活用し作業初期の段階で多数の関節を用いるが、後期において少ない数の関節のみで作業を実行でき、全体として作業達成確率が高くなるような場合が考慮に入れられていない。これは、機構の冗長解を考慮すると各フェーズ終了時における関節解が無数に生じるため、作業達成可能な関節組合せを求めることが不可能となるからである。

しかしながら、冗長解を用いるということは、より多くの関節を用いるため、多くの場合、作業達成確率が低くなると考えられる。そこで、本手法では冗長となる関節組合せを利用しないと作業実行が不可能な場合に限り、ロボットアームの冗長解を利用するという立場で関節組合せの算出を行った。ただし、3.2節で述べた手法は、関節組合せ系列 Ω_n の算出方法に依存しないので、より一層、ロボットアームの冗長性を有効に利用できる関節組合せ系列 Ω_n の算出手法を採用することもできる。

本手法による作業達成確率の有効な利用方法としては、次のような対象が考えられる。

ロボットアームの設計：ある作業に対して、どのようなロボットアームを設計するかといった選択、設計の際の指針に用いることができる。

軌道計画：表2で示されたように、ロボットアームに冗長性が存在した場合、どの関節を用いて作業を実行するかによって、複数の作業軌道が存在する。そのとき、作業達成の信頼性が高い軌道を選択するなど、ロボットアームの軌道計画に用いることができる。

6. 結 論

- (1) 本報告では、ロボットアームを対象として作業内容による作業達成条件の変化を考慮した作業達成確率による信頼性評価手法を提案した。
- (2) 簡単な例を用いて評価実験を行った結果、ロボットアームの持つ作業に対する柔軟性を作業達成確率の評価に反映させることができた。
- (3) また、関節の故障率を、その稼働状態によって区別し、評価を行うことができた。

今回は、モデルとして簡単な機構モデルを用いたが、将来はロボットアームのより詳細なモデルを用いることによって作業達成条件を各構成要素の故障モードにまで展開し、より綿密な評価が行えるようにしたいと考えている。また、作業達成の評価方法として運動学的観点から逆運動学解の存在により評価したが、一般的には、作業の達成条件は、動力学、制御などの観点からも評価しなければならない。今後は、これらの観点からの評価も付加して、より詳細な評価を行いたいと考えている。

なお、本研究は、原子力基盤技術クロスオーバー研究「原子力人工知能」における「ロボットシステムの自律型プラントへの適応性評価」の一環として理化学研究所で行われた。

参 考 文 献

- 1) B. S. Dhillon and O. C. Anude: Robot Safety and Reliability: A Review, *Microelectron, Reliability*, 33, 3, (1993) 413.
- 2) 井上成泰監修: FTA 安全工学, 日刊工業新聞社, (1979).
- 3) G. R. Burdic: Phased Mission Analysis, *IEEE Trans. Reliability*, R-26, 1, (1977) 43.
- 4) 琴坂信哉ほか: 機構モデルに基づく保全ロボットの信頼性評価, 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1992) 889.
- 5) T. Kohda and K. Inoue: Mission Reliability Analysis of Systems Composed of Components with Task-Dependent Degradation, *Proc. ISSAT, Int. Conf. Reliability & Quality in Design*, (1994) 10.