

UDC 614.8 : 007.5 : 007.2 : 005

マイクロエレクトロニクスを用いた自動生産システム の安全性評価 (第2報)

— ロボットによる災害を解析するための包括的論理モデル(その1)* —

佐藤吉信**

Safety Assessment of Automated Production Systems Using Microelectronics (2nd Report)

— The Comprehensive Logic Models for the Analysis of Accidents Caused by Robots
(Part 1)* —

by Yoshinobu SATO**

In spite of the fact that some workers were inadvertently killed or injured by industrial robots, we are obliged to use them, because we have yet to overcome such risks and increase productivity. Nevertheless, the robot will be developed and utilized not only for the industrial sectors, but also for our daily life, and in this context the safety of robots will become more important with greater social interest in the near future.

The purpose of this work is to improve the safety of robot systems, ranging from their design to use.

In the previous paper, a general technique to identify the hazards to be created in human-robot systems was discussed. The next step of the safety assessment is to analyze the logic of hazard causation mechanisms. In general, such analysis is made to given practical systems. On the other hand, the function to check the oversight in any implemented analysis is very important. Such function will be given by investigating, so to speak, comprehensive logic models made by assuming all cases of the hazard causation mechanisms.

Targets in this paper are two typical hazards, i. e., "Struck by robot body" and "Struck by robot arms". The comprehensive logic models which are used as such general-purpose fault trees are established with their hazards as top events (Fig.1~3). The comprehensive logic models resemble the MORT (Management Oversight and Risk Tree), and an individual fault tree can be obtained as a subset of the models, given an actual specification of the human-robot system.

Futher, the statistical independence among the basic events of the models is estimated, and the author concludes that the statistical independence is not expected under the general condition, but that three factors which dominate the interdependence among the basic events under that condition are extracted, and in addition, the assumption of statistical independence will be approximately satisfied in each fragmentary system phase defined by combining the factor-modes that are gained by dividing each factor into several modes (Fig. 4).

Finally, minimal cuts of the comprehensive logic models in some important system phases are then extracted to obtain the main system failure modes (Table 2).

Keywords: Safety Engineering, Safety Assessment, Robot, Human-Robot Systems
Hazard Analysis, Logic Models.

* Parts of this paper is to be read at the 63th Congress of the Japan Society of Mechanical Engineers (October 1985, Paper Number No.84-0628A)

* 日本機械学会第63期全国大会講演会にて論文講演予定 (昭.60.10.論文 No.84-0628A)

** 機械研究部 Mechanical Safety Research Division

1. 緒 言

設置台数の増加の著しい産業用ロボット¹⁾が、産業安全の立場からみると、危険有害作業の代替機能をはたす反面、その危険性についても無視できないものがあることについては、いくつかの労働災害事例²⁾からも明らかである。また、将来産業用ロボットに限らず、日常の社会生活にもロボットが普及されることが考えられる。このような状況に至った場合、ロボットの安全性が非常に重要な社会的問題となるであろうことは想像に難くない。

本研究は、現在使用されているものも含めて、今後実用化の予想されるロボットシステムの設計から使用までの各段階におけるその安全化計画に貢献することを目的としている。前報³⁾では、その第一段階として、人間—ロボット系において生じ得る潜在危険を同定した^{4),5)}。次の段階は、それら潜在危険生成機構の解析と抑制方法の検討である。潜在危険生成機構の解析は、通常具体的に条件が与えられた系について行われるが、一方実施された解析に見落としがないかなどをチェックする機能が非常に重要である。このような機能は、潜在危険生成機構の全ての場合を想定した、いわば包括的論理モデルを検討しておくことによって得られる。このような機能を有するモデル例としては、MORT⁶⁾があげられる。しかしこれは一般的な広範囲の安全管理上の見落としをチェックするためのものであり、これをそのまま人間—ロボット系のモデルとしては適用できない。また、人間—ロボット系に関連してこのような機能をもったモデルとして、例えば文献(7)があげられるが、これは現時点における人間—産業用ロボット系を取り扱ったもので限定的である。

本報では、それらの成果を踏まえ、今後出現の予想されるロボットシステムにも適用可能な潜在危険生成機構の包括的論理モデル（以下論理モデルと言う）を作成する。そして、論理モデルから、安全性評価の次の段階である系の定量的評価のために具備されるべき条件を考察し、定量評価に必要とされる最小カット集合を求める。

2. 論理モデルの記述方法と頂上事象

本研究では、論理モデルをFT (Fault Tree)^{8),9)}の記号を用いて記述する。この記号の主なものがFig. 3に説明されている。このうち本報で用いる特殊な記号「支分けゲート」を定義する。これは論理形式として抽象化あるいは一般化されたゲート以下の部分ツリーと論理表現

が同様となった他の部分ツリーの重複を避けるために用いる。支分けゲート以下の論理的表現は等価であっても、入力 of 具体的意味が異なるときには、出力はそのゲート上部および転出部位のうちから該当するもののみが発生するものとする。

論理モデルの頂上事象は、人間—ロボット系において、ロボットの人間に対する潜在危険により、人間に生ずる災害の発生である。この潜在危険と災害の型については、前報によって、ロボットおよびその系の条件に対して、非常に多様なものを同定した。それらのうち、ロボットが直接関連した人間に対する潜在危険における運動エネルギーの転移による災害として、人間がロボットにより打たれるものが考えられる (Fig. 1 E: 事象識別記号, 以下同様とする)。これは、ロボットが転倒 (Fig. 1, E_{a01}) や墜落 (E_{a02}) することによって生ずるものと、それ以外のロボットの運動によって生ずるものとに分類できる。さらに後者の場合を、ロボットの本体 (E_{a03})、腕 (E_{a04}) そしてロボットの扱い物 (E_{a05}) によって打たれるものとに細分できる。本報では、これらのうち、ロボットの本体および腕によって打たれる場合を検討する。

3. ロボットの本体により打たれる事象生起の論理モデル

「ロボットの本体により打たれる」(Fig. 1, E_{a03}) 事象は、「ロボット本体の運動」(E_{b07})、その運動エネルギーの作用からの人間の「防護の不適」(E_{b08})、そしてその作用を受け得る「危険域の人の存在」(E_{b09})の全事象が生起することにより生じ、その運動の速度や出力を条件 (条件1) として災害が発生する。

3.1 ロボット本体の運動 (Fig. 1, E_{b07})

この事象は、ロボットへ作用する外力によって生ずる「他律的運動」(E_{c05})と、ロボットに付随している動力源による「自律的運動」(E_{c06})とに分類される。

3.1.1 本体の他律的運動 (E_{c05})

この事象は、「外力の作用」(E_{d04})下でロボットあるいはその支援システムが、ロボットの力学的「安定化に失敗」(E_{d03})することによって生ずる。ただし、安定化に失敗する各モードと外力の種類との可能な組合せは、「外力の強度に依存」(条件2)している。

(1) 本体の力学的安定化に失敗 (E_{d03})

この事象が生起するモードには、ロボットの力学的安定化の「非自動制御時」(E_{e04})と「自動制御時」(E_{e05})

がある。

a 非自動制御下で安定化に失敗 (E_{e04})

この事象は、ロボットの支援システムの「不安定な支持」(E_{f06})と、ロボットまたは支援システムが外力の作用時にロボットの「固定に失敗」(E_{f07})することによって生ずる。

b 自動制御下で安定化に失敗 (E_{e05})

この事象は、ロボットへの「過負荷」(E_{f08})、ロボットの支持機構の「不安定な支持」(E_{f09})、ロボットへの動力や情報供給の「欠乏」(E_{f10})、制御系での「誤命令」(E_{f11})の発生、装置の「故障」(E_{f12})などの原因により生じ、外力の大きさによっては、「正常な制御時」(E_{f13})にも発生し得る。このうち「誤命令」(E_{f11})事象は、転出部位 No.29すなわち Fig. 2の事象 E_{e17} 下の仕分け OR ゲートへ連結される。

(2) 本体に外力が作用する (E_{d04})

この事象は、ロボットが何かに、あるいはロボットへ何か「衝突」(E_{e06})したり、「重力」(E_{e07})、「人為的な揺動」(E_{e08})、「地震」(E_{e09})などの作用によって生ずる。

3.1.2 本体の自律的運動 (E_{c06})

この事象の発生モードには、ロボットの「正常な移動路」(E_{d05})で生ずるものと、「異常な移動路」(E_{d06})で生ずるものがある。

(1) 正常な移動路でのロボットの自律的運動 (E_{d05})

これは、Fig. 2における事象 E_{d08} 下の仕分け AND ゲートすなわち転出部位 No.28へ連結される。

(2) 異常な移動路でのロボットの自律的運動 (E_{d06})

これは、「ロボットの誘導システムの失敗」(E_{e10})、異常を検知して自動的に停止するための「インターロックの不適」(E_{e11})、ロボットを強制的に停止させる「防護物の不適」(E_{e12})、およびロボットを作動させる「動力源の存在」(E_{e13})の全事象が生起することにより生ずる。このうち「インターロックの不適」(E_{e11})事象は、Fig. 2における事象 E_{d10} 下の転出部位 No.30へ、「防護物の不適」(E_{e12})事象は、Fig. 1における事象 O 下の転出部位 No.21へ連結される。

a 誘導システムの失敗 (E_{e10})

これは、制御系への「誤命令」(E_{f14})の発生や「誘導システムの故障」(E_{f15})により生ずる。前者 E_{f14} 事象は、Fig. 2における事象 E_{e17} 下の転出部位 No.29へ連結される。

b 動力源の存在 (E_{e13})

これは、「駆動源」(E_{f16})及び「制御用出力源」(E_{f17})

が共に存在することにより生ずる。「駆動源」(E_{f16})としては、電力や油空圧などによるものが考えられる。「制御用出力源」(E_{f17})としては、電力が主として考えられる。しかし、人間がうっかり制御部などに触れることが制御用出力源となってしまう場合も考えられる。

事象 E_{f16} は、例えば作業者が危険域に入るまえの手順としての遮断に失敗するような「定常的遮断の失敗」(E_{g05})、および非常停止のような「非定常的遮断の失敗」(E_{g06})の事象が共に生起することにより生ずる。

事象 E_{f17} は、事象 E_{f16} 下の転出部位 No.57へ連結される。

3.2 防護の不適 (Fig. 1 E_{b08})

ここでの防護とは、ロボット、ロボットと人間との間、または人間において、災害発生の直接原因となるエネルギーの伝播を阻止したり、緩衝する機能を意味する。事象 E_{b08} は、Fig. 1における事象 O 下の転出部 No.21へ連結される。この事象の原因モードとして、防護が技術的に「不可能」(O_{a01})、可能であるがそれぞれが「用意されていない」(O_{a02})、用意されているが故障や性能など機構自体の原因で「効用的に機能しない」(O_{a03})、設置されているものを「人間が無効にする」(O_{g04})、そして保護具や安全装置などが用意されていて取りつけて使用すべきものを「使用しない」(O_{a05})などがある。

3.3 危険域に人の存在 (Fig. 1, E_{b09})

この事象は、Fig. 3の事象 N 下の転出部位 No.22へ連結される。

4. ロボットの腕により打たれる事象生起の論理モデル

「ロボットの腕により打たれる」(Fig. 2, E_{a04})事象は、ロボットの「腕の運動」(E_{b10})、「防護の不適」(E_{b11})そして「危険域に人の存在」(E_{b12})事象の全てが生起することにより生じ、運動の出力と速度を条件として災害が発生する。

4.1 ロボットの腕の運動 (Fig. 2, E_{b10})

腕の運動モードとして、ロボット本体の運動とは独立し、しかも外力が作用することによる「他律的運動」(E_{c07})、腕の動力源による「自律的運動」(E_{c08})があり、また「ロボット本体に連動した運動」(E_{c09})もある。

4.1.1 腕の他律的運動 (E_{c07})

この事象は腕に「外力が作用」(E_{d08})するとき、腕の力学的「安定化に失敗」(E_{d07})することにより生ずる。ただし、安定化に失敗する各モードと外力の可能な組み合わせは、外力の大きさに依存している。

(1) 腕の力学的安定化に失敗 (E_{d07})

これは、腕の運動の「非自動制御下」(E_{e14})に生ずる場合と「自動制御下」(E_{e15})に生ずる場合とがある。

a 非自動制御下で力学的安定に失敗 (E_{e14})

これは、Fig. 1の事象 E_{e04} 下の転出部位 No.49へ連結される。

b 自動制御下で力学的安定化に失敗 (E_{e15})

これは、「装置の故障」(E_{f18})、「過負荷」(E_{f19})、動力源や情報など必要物の「欠乏」(E_{f20})、制御系への「誤命令の発生」(E_{f21})、そして外力の大きさによっては「正常な制御状態」(E_{f22})によっても生ずる。このうち事象 E_{f21} は Fig. 2における事象 E_{e17} 下の転出部位 No.29へ連結される。

(2) 腕に外力が作用する (E_{d08})

この事象は、Fig. 1における事象 E_{d04} 下の転出部位 No.41へ連結される。

4.1.2 腕の自律的運動 (E_{c08})

この事象は、制御系への「動作命令」(E_{d09})、人間の存在などの異常を検知して運動を停止させる「インターロックの失敗」(E_{d10})、および運動のための「動力源の存在」(E_{d11})事象が全て生起することにより生ずる。

(1) 腕の動作命令 (E_{d09})

動作命令は、ロボットの管理上から、「意図された命令」(E_{e16})と「意図されない命令」(E_{e17})とに分類できる。

a 意図された動作命令 (E_{e16})

これは、ロボットの「動作プログラムの開始」(E_{f23})や「一時的停止条件の解消」(E_{f24})などにより生ずる。

b 意図されない動作命令 (E_{e17})

これは、「制御の失敗」(E_{f25})「プログラムの不適」(E_{f26})「プログラム選定の誤り」(E_{f27})またはその他の「人間の操作の誤り」(E_{f28})により生ずる。

(a) 制御の失敗 (E_{f25})

この事象は、「サーボ機構の異常」(E_{g07})、「電子回路の異常」(E_{g08})、制御系への「誤信号の発生」(E_{g09})、または「その他の部分の異常」(E_{g10})によって生ずる。

i) サーボ機構の異常 (E_{g07})

これは、油圧系の「油の汚濁」(E_{h01})、「サーボ弁の故障または異常」(E_{h02})、あるいは「油空圧など制御系への

必要物供給の欠乏」(E_{h03})などより生ずる。

ii) 電子回路の異常 (E_{g08})

これは、回路の「断線」(E_{h04})、「短絡」(E_{h05})、または I. C. 素子に代表される「電子部品劣化」(E_{h06})などにより生ずる。

iii) 誤信号の発生 (E_{g09})

これは、「静電気放電」(E_{h07})、「瞬時停電」(E_{h08})、「内部発生源からのノイズ」(E_{h09})、「外部発生源からのノイズ」(E_{h10})、「内界センサーの異常」(E_{h11})、「外界センサーの異常」(E_{h12})、「関連する装置からの誤信号」(E_{h13})、または「プログラム読み取りエラー」(E_{h14})などにより生ずる。

(2) インターロックに失敗 (E_{d10})

この事象は、人間の存在などの「異常検知に失敗」(E_{e18})、「作動に失敗」(E_{e19})、人間がインターロック装置を「無効にする」(E_{e20})、またはインターロック機構が「設置されていない」(E_{e21})などにより生ずる。

(3) 動力源の存在 (E_{d11})

この事象は、Fig. 1の事象 E_{e13} 下の転出部位 No.56へ連結される。

4.1.3 腕が本体に連動する (E_{c09})

この事象は、Fig. 3における事象 E_{c09} の転出部位 No. 54へ連結される。

4.2 防護の不適 (Fig. 2, E_{b11})

この事象は、Fig. 1の事象 O 下の転出部位 No.21へ連結される。

4.3 危険域に人の存在 (Fig. 2, E_{b12})

この事象は、Fig. 3の事象 N 下の転出部位 No.22へ連結される。

5. 危険域に人が存在する事象生起の論理モデル

「危険域に人が存在」(Fig. 3, N) 事象は、人がそこへ「必要上接近して」(N_{a01}) 生ずるものと「不必要に接近して」(N_{a02}) 生ずるものがある。

5.1 必要上接近して存在 (Fig. 3, N_{a01})

この事象は、「ロボットに無関係の作業」(N_{b01})、「ロボットに関連した作業」(N_{b02})、または「ロボットによる補助機能を受ける」(N_{b03}) ために生ずる。

5.1.1 ロボットに無関係の仕事で存在 (N_{b01})

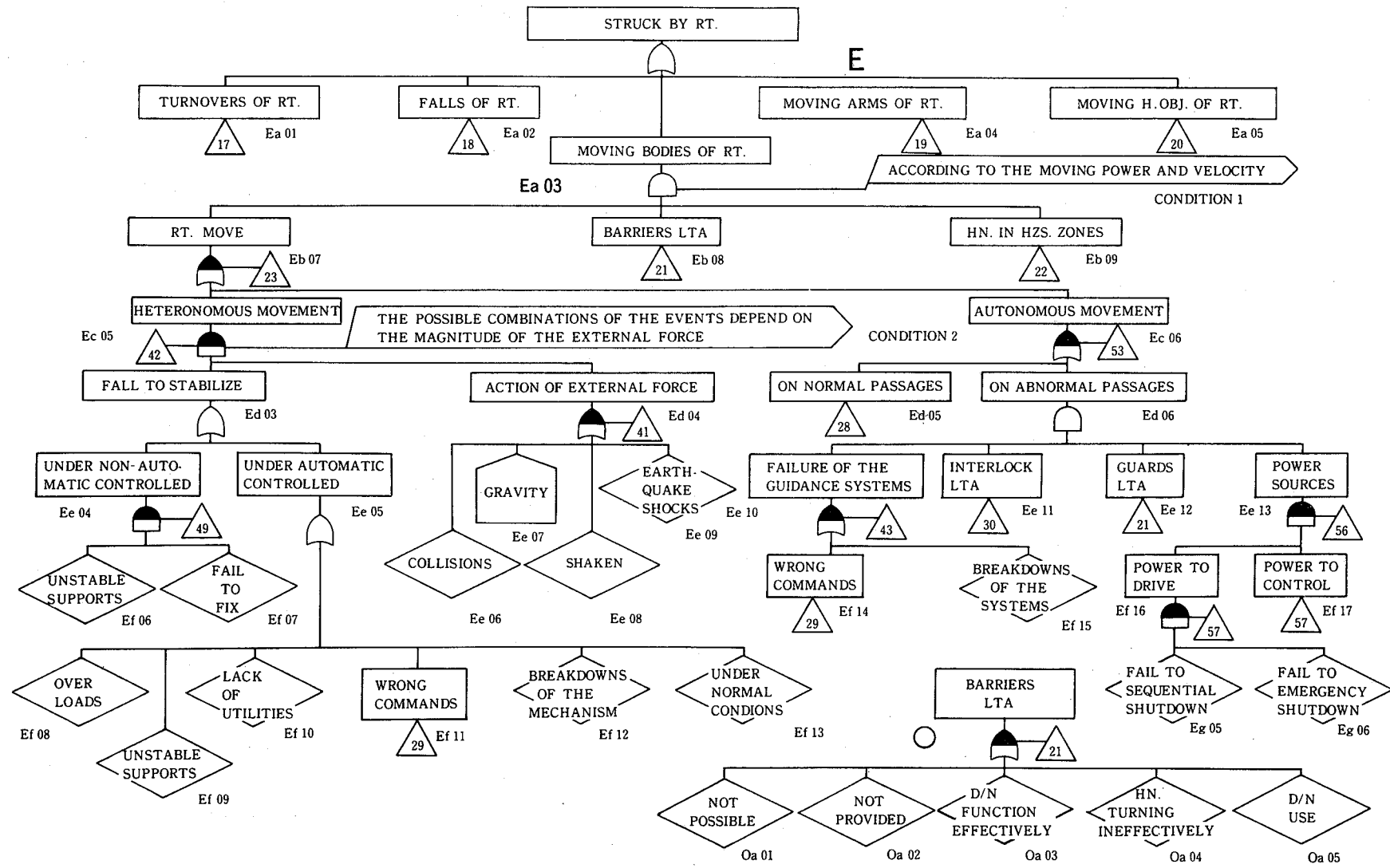


Fig. 1 Comprehensive Logic Model for the analysis of the accident caused by striking a human of a moving robot body.
人間がロボットの運動する本体により打たれることにより生ずる災害を解析するための包括的論理モデル

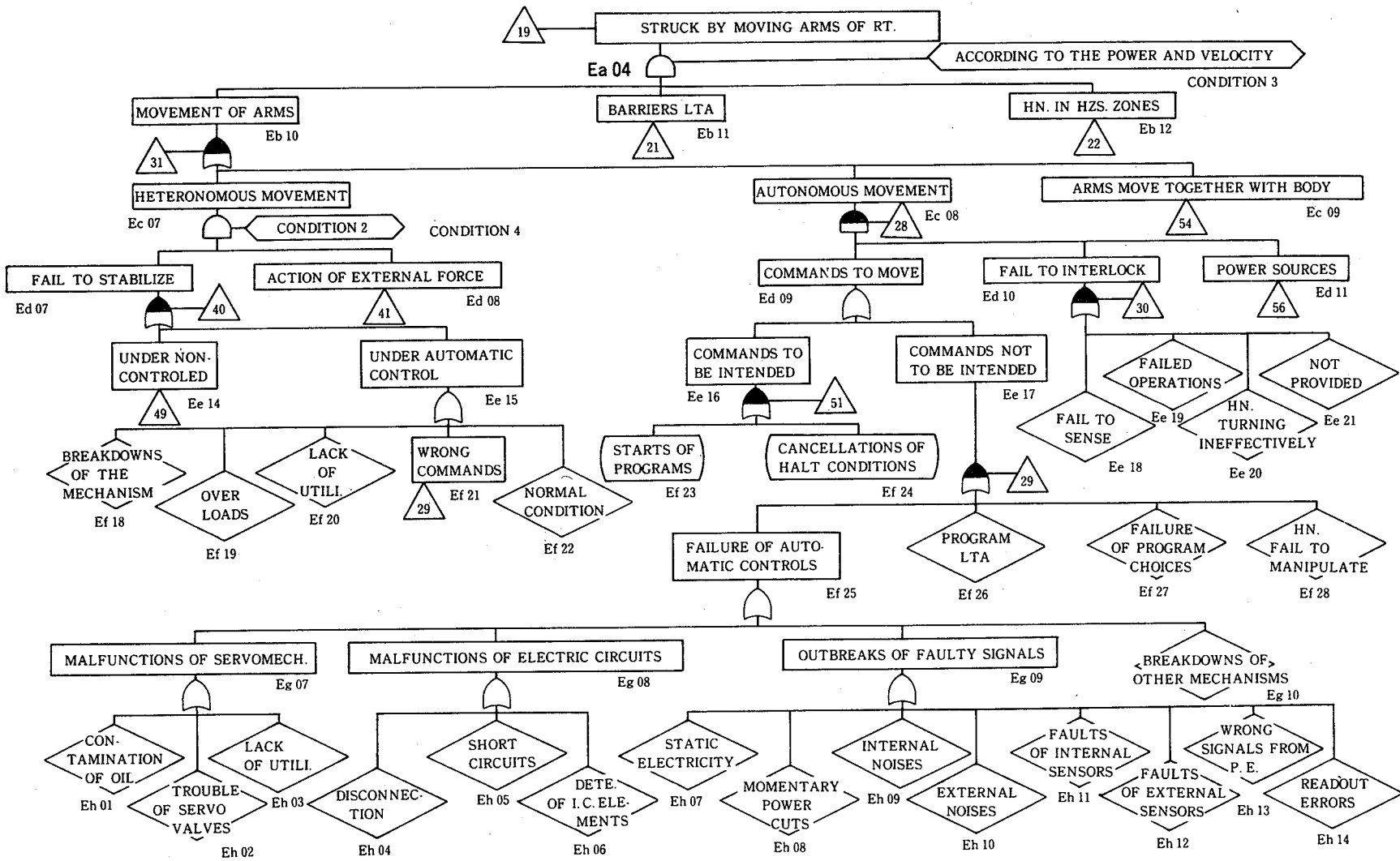


Fig. 2 Comprehensive Logic Model for the analysis of the accident caused by striking a human of a moving robot arm.
 人間がロボットの運動するアームにより打たれることにより生ずる災害を解析するための包括的論理モデル

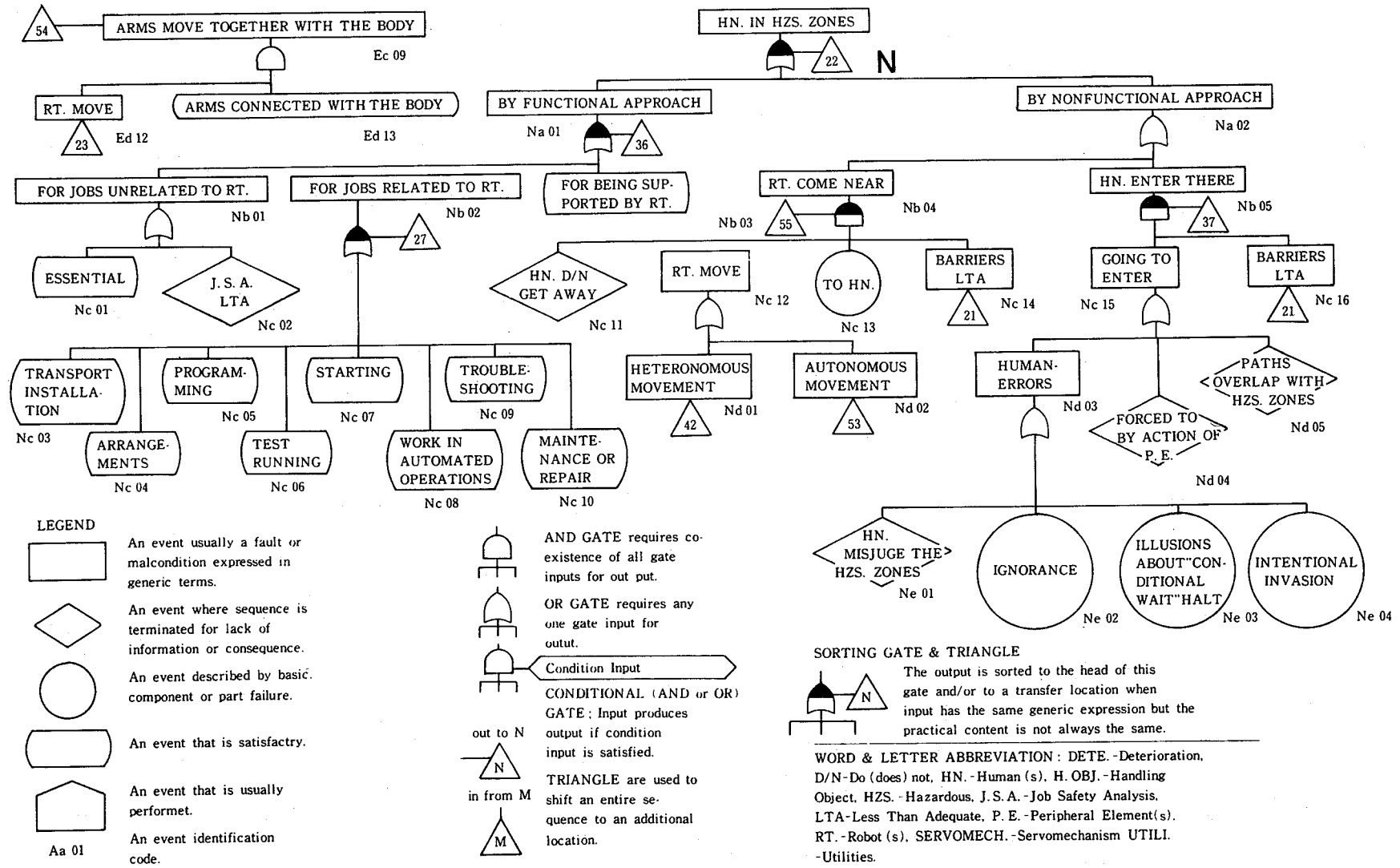


Fig. 3 Comprehensive Logic Model for the analysis of a human existing in a hazardous zone.
人間の危険域への存在を解析するための包括的論理モデル

これは、「本質的に不可避」(N_{c01})な場合や、避け得るにもかかわらず「作業安全解析の不適」(N_{c02})に代表される安全管理上の見落としにより生ずる。

5.1.2 ロボットに関係する仕事で存在 (N_{b02})

これは、ロボットの「運搬・設置作業」(N_{c03})、「段取り・調整作業」(N_{c04})、「教示作業」(N_{c05})、「ためし運転」(N_{c06})、「起動操作」(N_{c07})、「自動運転付随作業」(N_{c08})、「異常処理作業」(N_{c09})、または「保全・修理作業」(N_{c10})により生ずる。

5.2 不必要に接近して存在 (N_{a02})

この事象は、「ロボットが人間に不必要に接近する」(N_{b04})ことによるものや、「人間が不必要に危険域に入りこむ」(N_{b05})ことより生ずる。

5.2.1 ロボットが人間に接近する (N_{b04})

この事象は、ロボットが「人間の方向へ」(N_{c13})、「移動し」(N_{c12})、「人間が逃げず」(N_{c11})、「防護が不適」(N_{c14})事象全てが生起することより生ずる。ロボットの「移動」(N_{c12})には「他律的運動」(N_{d01})によるものと「自律的運動」(N_{d02})によるものがあり、それぞれ Fig. 1 における事象 E_{c05} 下の転出部位 No.42 および事象 E_{c06} 下の転出部位 No.53 へ連結される。また、事象 N_{c14} は、Fig. 1 における事象 O 下の転出部位 No.21 へ連結される。

5.2.2 人間が危険域に入り込む (N_{b05})

この事象は、人間がそこに「入ろうとする」(N_{c15})事象と、柵や表示などによりそれを防ぐ「防護が不適」(N_{c16})事象が共に生起することにより生ずる。後者事象 N_{c16} は Fig. 1 における事象 O 下の転出部位 No.21 へ連結される。

(1) 人がそこへ入ろうとする (N_{c15})

この事象は、「人的過誤」(N_{d03})、押されるなど「周囲の機械装置の影響によって」(N_{d04})、また「人の通路が危険域と重なっている」(N_{d05})などにより生ずる。

a 人的過誤 (N_{d03})

この事象は、「人が危険域の判断を誤って入ろうとする」(N_{e01})、「危険域について全く知らないで入ろうとする」(N_{e02})、「ロボットの条件待ち停止を完全停止と錯覚して入ろうとする」(N_{e03})、または「危険を承知で故意に侵入しようとする」(N_{e04})などにより生ずる。

以上の包括的論理モデル (Fig. 1 ~ 3) における転出部位すなわち仕分けゲートの位置を、その番号に対して、仕分けゲート上の事象識別記号を対応させることにより、一覧表として Table 1 に示す。

Table 1 A list of sorting gate locations
支分けゲート位置一覧

Number in triangles	Event identification code above the triangles.
21	O (Fig. 1)
22	N (Fig. 3)
23	E b 07 (Fig. 1)
27	N b 02 (Fig. 3)
28	E c 08 (Fig. 2)
29	E e 17 (Fig. 2)
30	E d 10 (Fig. 2)
31	E b 10 (Fig. 2)
36	N a 01 (Fig. 3)
37	N b 05 (Fig. 3)
40	E d 07 (Fig. 2)
41	E d 04 (Fig. 1)
42	E c 05 (Fig. 1)
43	E e 10 (Fig. 1)
49	E e 04 (Fig. 1)
51	E e 16 (Fig. 2)
53	E c 06 (Fig. 1)
55	N b 04 (Fig. 3)
56	E e 13 (Fig. 1)
57	E f 16 (Fig. 1)

これにより転入部位から転出部位を容易に見出すことが可能となる。

6. 系の相分割と最小カット集合

6.1 基本事象間の相互依存性と系の相分割

論理モデルの頂上事象の発生確率を定量的に評価するとき、基本事象間の統計的独立性が仮定できないと、定量化が極めて複雑になる。論理モデルから、例えば「ロボットに関連した作業」(N_{b02})以下の各事象と「安定化に失敗」(E_{d03})以下の各事象の相互依存性をみてもわかるように、一般的条件下では系の基本事象間の統計的独立性は期待できない。この困難を解決する手段として、系の相分割が考えられる。ここで系の相分割とは、系の基本事象間の相互依存性に支配的な特性に着目し、それらの特性を適当なモードに分割し、各特性のモードを結合することにより得られる系のある局面では、基本事象間の統計的独立性が期待できるようにするものである。

人間—ロボット系では、少なくともロボットの運転や修

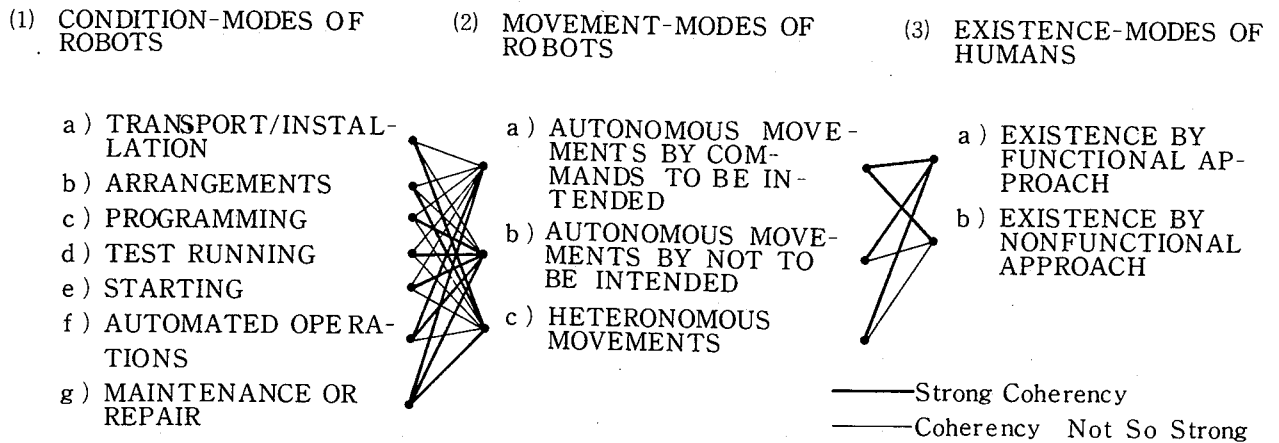


Fig. 4 Modes to obtain system phases and the coherency among them.
 系の相を構成するモードとそれらの結合性

理などの状態、ロボットの運動、そして人の存在などの特性間でモード結合を行って、系を相分割する必要がある。定量的評価を行う場合には、系の各相で得られる結果を統合することにより全体の評価を得ることができる。

6.2 系の各特性におけるモードとそれらの結合性

(1) ロボットの状態特性を a) 運搬・設置 b) 段取り・調整 c) 教示 d) ためし運転 e) 起動 f) 自動運転 g) 保全・修理 にモード分割する。

(2) ロボットの運動特性を a) 意図された命令による自律的運動 b) 意図されない命令による自律的運動 c) 他律的運動 にモード分割する。

(3) 人の存在特性を a) 必要上接近して存在 b) 不必要に接近して存在 にモード分割する。

次に各モードの結合性を考察する。

運搬・設置モードや段取り・調整モードでは、ロボットが自動制御下でない場合が多く、他律的運動モードとの結合性が強い。教示、ためし運転、あるいは起動モードでは、接近している作業者がロボットの正常動作を把握している場合が多く、相対的に意図されない命令による自律的運動モードとの結合性が強い。自動運転モードでは、意図されたあるいは意図されない命令による自律的運動モードとの結合性が強い。保全・修理モードでは、そのときの状況によって、どの運動モードとも結合性が強まる。

人が必要上接近して存在するモードでは、そのときの状況によって、どの運動モードとも結合性が強まる。人が不必要に接近して存在するモードでは、意図された命令による自律的運動モードとの結合性が強くなる。これ

は、ロボットの動作を把握していない人間が不必要に接近する機会が多いためである。

以上の考察結果を Fig. 4 に示す。

6.3 系の代表的な相における主な最小カット集合

系の代表的な相 a) - c) - a) , b) - c) - a) , c) - b) - a) , d) - b) - a) , e) - b) - a) , f) - a) - a) , f) - a) - b) , f) - b) - a) , g) - b) - a) , g) - c) - a) において求められる論理モデルの主要な最小カット集合を Table. 2 に示す。ここに記号は、状態特性モード - 運動特性モード - 存在特性モード) に対応している。

また、ここでは、仕分けゲートからの出力は、一箇所にのみ発生し、基本事象が互いに独立であると仮定している。以上から、各カットは、その具体的内容によって、事象 E_{a03} または E_{a04} のいずれかを発生することとなる。

7. ま と め

本報では、人間-ロボット系において、ロボットが直接関連した人間に対する潜在危険における運動エネルギーの転移により生ずる災害のうち、人間がロボット本体または腕によって打たれるものについての包括的な論理モデルを作成した。このモデルにより、任意の人間-ロボット系のそれらの災害に関する安全性解析に見落としがないかチェックすることが可能である。また、具体的な系の FT はこのモデルの一部としても得られる。さらに、系の定量的評価を行う際に、基本事象間に統計的独立性が仮定できるよう、系の相分割を行うことの必要性を述べ、相分割の方法を示した。そして、系の代表的な相

Table 2 Important minimal cut sets in the main phases of the Comprehensive Logic Models.
論理モデルの主な相における主要な最小カット集合

Main Phases of comprehensive System in Fig. 4	Important Minimal Cut Sets in the Phases*
(1)-(2)-(3) a)-c)-a)	(Nc03, Ef06, Ef07, Ee07)(Nb03, Ef06, Ef07, Ee08) (Nb03, Ef06, Ef07, Ee06)(Nb09, Ef06, Ef07, Ee09)(Nb01, Ef06, Ef07, Ee07)(Nb01, Ef06, Ef07, Ee08)(Nb01, Ef06, Ef07, Ee06)(Nb01, Ef06, Ef07, Ee09)
b)-c)-a)	(Nc04, Ef06, Ef07, Ee07)(Nc04, Ef06, Ef07, Ee08) (Nc04, Ef06, Ef07, Ee06) (Nc04, Ef06, Ef07, Ee09)
c)-b)-a)	(Nc05, Ef23, Ed10, Ed11)(Nc05, Ef24, Ed10, Ed11) (Nc05, Ef25, Ed10, Ed11) (Nc05, Ef26, Ed10, Ed11)
d)-b)-a)	(Nc06, Ef23, Ed10, Ed11)(Nc06, Ef24, Ed10, Ed11) (Nc05, Ef25, Ed10, Ed11) (Nc06, Ef26, Ed10, Ed11)
e)-b)-a)	(Nc07, Ef23, Ed10, Ed11)(Nc07, Ef24, Ed10, Ed11) (Nc07, Ef25, Ed10, Ed11) (Nc07, Ef26, Ed10, Ed11)
f)-a)-a)	(Nb01, Ee16, Ed10, Ed11)(Nc08, Ee16, Ed10, Ed11) (Nc09, Ee16, Ed10, Ed11) (Nb03, Ee16, Ed10, Ed11)
f)-a)-b)	(Nc15, Nc16, Ee16, Ed10, Ed11)(Nc11, Nc12, Nc14, Ee16, Ed10, Ed11)
f)-b)-a)	(Nb01, Ef23, Ed10, Ed11)(Nb01, Ef24, Ed10, Ed11) (Nb01, Ef25, Ed10, Ed11) (Nb01, Ef26, Ed10, Ed11)(Nc08, Ef23, Ed10, Ed11) (Nc08, Ef24, Ed10, Ed11) (Nc08, Ef25, Ed10, Ed11)(Nc08, Ef26, Ed10, Ed11) (Nc09, Ef23, Ed10, Ed11) (Nc09, Ef24, Ed10, Ed11) (Nc09, Ef25, Ed10, Ed11) (Nc09, Ef26, Ed10, Ed11) (Nb03, Ef23, Ed10, Ed11) (Nb03, Ef24, Ed10, Ed11) (Nb03, Ef25, Ed10, Ed11) (Nb04, Ef26, Ed10, Ed11)
g)-b)-a)	(Nc10, Ef23, Ed10, Ed11)(Nc10, Ef24, Ed10, Ed11) (Nc10, Ef25, Ed10, Ed11) (Nc10, Ef26, Ed10, Ed11)
g)-c)-a)	(Nc10, Ef06, Ef07, Ee07)(Nc10, Ef06, Ef07, Ee08) (Nc10, Ef06, Ef07, Ee06) (Nc10, Ef06, Ef07, Ee09)

* Which generates the event Ea03 or Ea04, under the condition that the events Eb08 and Eb11 are usually caused.

について、その主要な最小カット集合を求めた。

謝辞 本論文は筆者が京都大学工学部へ国内留学中に完成されたものであり、井上紘一助教授、熊本博光助手の御指導をいただいた。また、国内留学実現に御尽力された、関係各位に衷心より感謝申し上げる。

(昭和60年7月18日受付)

文 献

- 1), 2) 現時点における産業用ロボットの定義および災害事例については、労働省安衛部安全課編安衛則通覧(ロボット条項)(昭和58年9月)労働基準調査
- 3) 佐藤・杉本・前, マイクロエレクトロニクスを用いた自動生産システムの安全性評価(第1報; エネルギー転移連鎖と産業用ロボットの潜在危険), 産業安全研究所研究報告 RIIS RR-32-5 (昭59), 1~10
- 4) 佐藤・井上, 潜在危険同定論, 第17回安全工学研究発表会講演予稿集(昭59.12), 71~74
- 5) 佐藤・井上, 人間-ロボット系の安全性評価(第1報; 作用一変化と作用連鎖モデルによる潜在危険の同定), 日本機械学会論文集51-468-C (昭60.8)
- 6) W. G. Johnson, MORT Safety Assurance Systems (1980), Marcel Dekker, INC.

- 7) 川口他3名, 産業用ロボットの危険性とFTA, 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-82-1 (昭57)
- 8) 井上監修, FTA 安全工学, (昭54), 日刊工業新聞社
- 9) 塩見他, FMEA, FTA の活用, (昭58), 日科技連出版社