

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1982

産業用ロボットの危険性と FTA

川	口	邦	供
杉	本		旭
佐	藤	吉	信
袴	塚	禎	三

産業用ロボットの危険性と F T A

川 口 邦 供 *
杉 本 旭 **
佐 藤 吉 信 **
袴 塚 禎 三 **

Safety problems with Industrial Robots and FTA

Kunitomo KAWAGUCHI*
Noboru SUGUMOTO**
Yoshinobu SATO**
Teizo HAKAMAZUKA**

Considering that Robots take over dangerous job, it seems ironic to say that the robot also poses certain safety problems. Today more than 90,000 robots are used in Japan. We have already experienced some accidents caused by robots. And much more incidents occurred.

These experiences show that robots have not been enough reliable and it sometimes leads to accidents, and that there always exist many kinds of manual operation done by workers around robots and peripheral equipments, in spite of robots as tools of labor-saving.

In this study, we have first classified manual operation related to robots, namely,

- (a) Transport, Installation
- (b) Preparation
- (c) Programming (Teaching)
- (d) Testing
- (e) Starting
- (f) Job during an automatic operation
- (g) Trouble-shooting
- (h) Maintenance, Adjustment

Secondly, we have identified the possible hazards involved in these manual operations by means of an effective check-list for inductively pinpointing the type of accidents. Table 6 gave a result which make it possible to examine the accidents that may occur in a man-robot operation system.

Thirdly, the causes of accident were deductively analyzed, and Fault Tree Analysis (FTA) shown in Fig. 3 has been obtained as a result. By this FTA, it has become possible to grasp clearly the causes of the accident that may occur in a man-robot operation system.

* Director — General

** Mechanical Engineering Research Division

は じ め に

現在は技術革新の谷間に当り、新しい革新的技術の出現は少ない状態にあるという見方もある。しかし、こと省力化、自動化に関連した分野においてはそうは思えない。特に最近におけるマイクロエレクトロニクスの進展による第3次産業革命の波は生産機械、運搬機械や搬送機械などのメカトロ化の進展を促し、生産態様を激変しつつあると言える。むしろ、この分野では技術革新の大波がとうとうと押し寄せて来つつあると考えたほうがよさそうである。

特にマイクロエレクトロニクスの技術が産業用ロボットに取込まれ、その機能や信頼性を著しく向上させたことが、これまでの生産態様を激しく変化させようとする大きな要因とされる。しかもそれが目を見張るスピードで産業界に浸透して行ったことで、社会や経済は少なからずインパクトを受けている。

第一次産業革命のもととなった蒸気機関、第二次産業革命のもととなった大量生産方式の自動化の例にみるまでもなく、産業革命の担い手と称せられる機械や技術は常にプラスとマイナスの二面性を持ち、そのマイナス面を正常に解決して行かない限りは、社会にストレスを与え、パニック状態を招くことにもなりかねない。

産業用ロボットが技能労働力の不足している分野の作業や危険有害作業に活用できるのをはじめ、その導入によって加工精度の向上がはかられ、また品質も一定になるなどの理由から、これが第三次産業革命の担い手として注目される半面、雇用、労働条件と職種の変容に悪い影響を与えるとする懸念もあるが、これらはもととは言えば産業用ロボットが人間の代替えを目的として登場し、かつ急速に普及しつつあるからに他ならない。

産業安全の立場から見ても、産業用ロボットは二面性を持っている。一つはこれまで人間が行っていた危険有害作業に産業用ロボットを導入して作業の安全化をはかるというプラス面であり、もう一つは、産業用ロボット自体によって生ずる危険性というマイナスの面である。

産業用ロボットがもっている危険性が、同時に有する有効性を台無しにしてしまうことのないよう、ここでは、すでに得られた災害やヒヤリ事故などの資料分析やロボット作業の現場調査の分析を行って、ロボットに係わる作業に潜在する危険性を明確にし、今後採られるべき適正な安全対策への基礎的技術資料としてまとめた。

1. 産業用ロボットの定義

産業用ロボットについては、現在では統一された定義が存在しないが、日本産業用ロボット工業会では「3次元空間において、自由度の高い多様な動作を行うことができる機能を有するもの」と解しており、現状では、「人間の四肢（腕や手）の動作機能に類似した多様な動作機能を有するものか、または感覚機能や認識機能を有し、自律的に行動できるもの（知能ロボット）」ということができる。

さらに、国際特許分類（IPC）によると、ロボットは「生体の運動部の機能に類似した柔軟な動作機能を有するもの、もしくはこの動作機能を有し、かつ知的機能を備えたもので、人間の要求に応じて動作しうるもの」である。ここでいう知的機能とは、検出、記憶などを媒介して、判断、認識、適応、学習などのいずれかを司る能力をいう。

これに対して森らは、現在ある産業用ロボットをさらに発展させた、いわゆるロボットに要求される7つの特性を主張している。それらは、移動性、個性性、知能性、汎用性、半機械半人間性、自動性、奴隷性である。そして、以上の7つの特性を総合してロボットには①自動、②動きと移動、③個体の三つの基本特性を抽出できるとし、要するに、ロボットは半機械半人間性を実現できる機械であるとしている。

一方、産業用ロボットの関連用語をまとめた日本工業規格 JIS B0134（産業用ロボット用語）の中では産業用ロボットを入力信号および動作形態からそれぞれ表1、図1のように分類した。ここでは、産業用ロボットの定義はなされていないが、これらの分類の総称を産業用ロ

表1 産業用ロボットの入力信号からの分類

用 語	用 語 の 意 味
マニュアル・マニプレータ	人間が操作するマニプレータ。
固定シーケンス・ロボット	あらかじめ設定された順序と条件および位置に従って動作の各段階を逐次進めてゆくマニプレータで、設定情報の変更が容易にできないもの。
可変シーケンス・ロボット	あらかじめ設定された順序と条件および位置に従って動作の各段階を逐次進めてゆくマニプレータで、設定情報の変更が容易にできるもの。
プレイバック・ロボット	あらかじめ人間がマニプレータを動かして教示することにより、その作業の順序、位置およびその他の情報を記憶させ、それを必要に応じて読み出すことにより、その作業を行えるマニプレータ。
数値制御ロボット	順序、位置およびその他の情報を、数値により指令された作業を行えるマニプレータ。 例：せん孔紙テープ、カードやデジタルスイッチなどによるもの。
知 能 ロ ボ ッ ト	感覚機能および認識機能によって行動決定のできるロボット。

注：マニプレータとは人間の四肢の機能に類似した機能を持ち、対象物を空間的に移動させるもの。

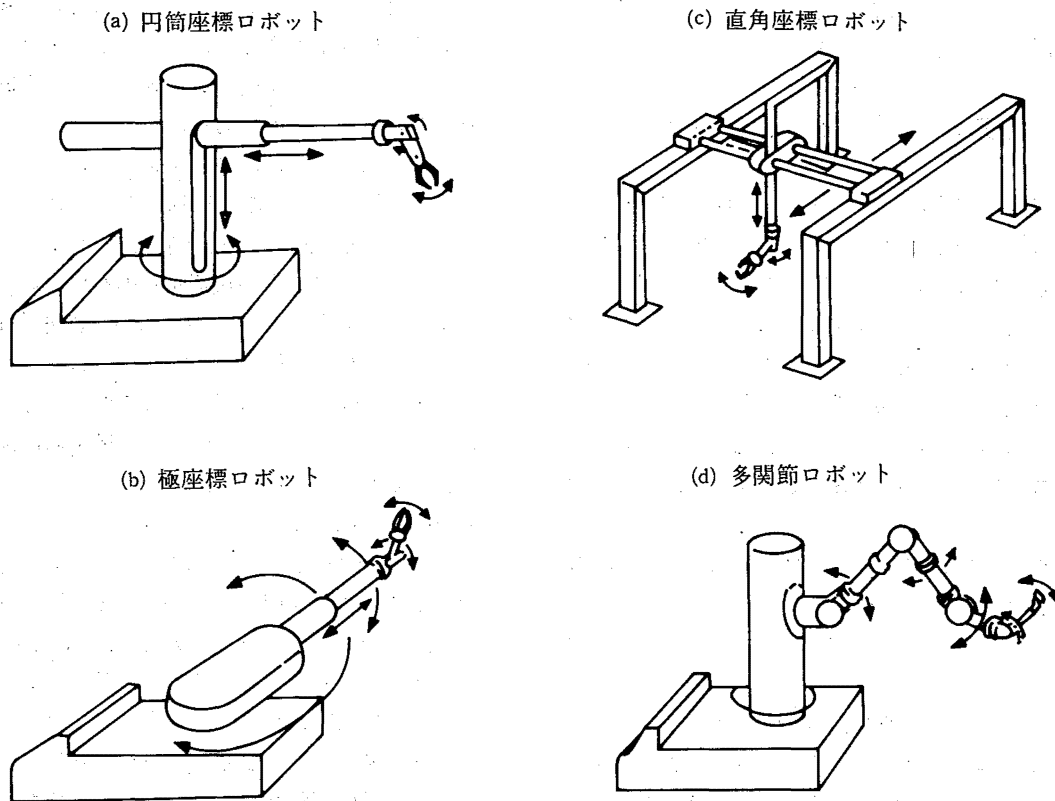


図1 産業用ロボットの動作形態からの分類

ロボットだという含みを持たせている。

このように、産業用ロボットとは何かを明確に言い表わした定義はまだないというのが実情のようである。この点アメリカでも同様であり、サーボロボット以上の機能を有する高級なものが産業用ロボットに入れるべきだとする意見もあり、やはりJISの分類には合致していない。

しかし、それがもつ危険性という観点から、産業用ロボットの特徴を抽出する場合は、これが技術的に高度であるか否かは余り重要な問題ではない。そして、その危険性が現行の労働安全衛生規則によって完全にカバーされているものであれば安全上の問題をここで改めて提起するものはないはずである。

しかし、大半の産業用ロボットが現行の労働安全衛生規則に従って安全対策が可能である反面、全く適用不可能な危険な作業形態が存在するのも確かである。そして、それは何なのか、なぜなのか、を分析することが本技術資料の目的である。だが、上記のいずれの定義においても、ロボットに共通した危険性を抽出することはできない。そこで本研究では、議論の発散を防ぐため、対象の

ロボットを次の条件を同時に満たすものに限定してそれらが持つ危険性を検討することにした。すなわち、

- (1) 自由度の大きな腕を有するもの（先端に物を把持するための手を有するものもある）、
 - (2) 腕の持つパワーが大きいもの、
 - (3) 自律制御される（自動で動作しうる）もの。
- （ただし人間が常時操作し続けることによってのみ動作するものは除く）

である。入手した災害データ及びヒヤリ事故データが示すように、これら条件を満たす機械では、腕が作業者の管理をはなれ不意に起動する可能性があり、それが、作業者に危険となる場合がある。このような機械には、現在実働する大半の産業用ロボットが含まれ、また、固定シーケンスロボットから知能ロボットにわたる制御の違いはあまり問題とはならない。したがって、本技術資料では、ロボットの正確な定義を云々することは控え、上記3つの条件を満たす機械を一応産業用ロボット（又はロボット）と呼ぶことにした。

しかし、今後、無人搬送車、生物移動機械も産業界に広く浸透すると考えられ、智能化された移動装置の安全

上の問題が生ずるという懸念もあるので、これらについては別途検討してゆくつもりである。

2. 産業用ロボットによる災害

労働災害は常に悲惨なものであるが、産業用ロボットの危険性をつきとめるには、過去の災害の経験が大いに役に立つ。しかしながら、産業用ロボットが登場してまだ日が浅く、災害報告書における起因物としてもその項目が確立していないため、これによる災害は、一般動力機械等による災害分類の中に埋没しているものも少なくないと考えられる。そこで、筆者らが把握している災害やヒヤリ事故が数十件にのぼるとは言え、実際の災害報告書から得られるデータは少ない。

しかし何件かの災害事例が得られている。それらの事例を見てみよう。

事例 1

溶接ロボット職場で、被災者が同僚 2 名に溶接ロボットについて説明のためロボットのポジション部に立入った時、オペレータが被災者を確認せず起動ボタンを押したためポジション上のフレームとロボットの腕の間で胸腹部を挟まれた。

事例 2

オートローダ（可変シーケンスロボット）によるコンベア・センタリング機械間の送給・取出し作業場で、コンベア上でオートローダに背部を押えつけられた。被災者はコンベア上で加工不良のワークを発見し、ロボットが停止しているのでコンベア上に上り、両手でこれを持ち上げて除去しようとした時、リミットスイッチが作動してアームが動き出したものと推定される。

事例 3

被災者はロボット連動のシェービング機械のトラブルを発見し、それを補正するため機械のロボット連動スイッチを切り、手動スイッチにより確認調整を行い調整後、ロボット連動スイッチを入れたところ、背後で待機中のロボットのアームがフルアウトして機械間に圧迫された。

以上はロボットによる死傷災害の事例であるが、これらの災害は、ロボットが使い方によっては人を死に至らしめるに十分な腕力を持つことを知らしめただけでなく、ロボット特有のいくつかの災害パターンをも提示してい

る。それは、共にロボットが停止状態に安易に危険領域に入り、被災者の意識の外で起動した場合の災害ということである。また、被災者の死角となる方向（背後、側方など）からアームにおそわれた時は、アームの移動速度が遅い場合でも逃げきれずに大きな災害になりうることをも示している。この起動を生じさせる方法は、オペレータによる起動ボタン、条件待ち停止を切るためのリミットスイッチ、周辺機器からのインタロック信号などによるものであったが、いずれの方式でも作業者にとって不意の起動となる場合は危険がある。

従来型の機械の中にも危険な作業点や作業域という概念を持つものはあるが、それは機械設備内部にあるのが一般的であったのに対し、ロボットではユニット外部に広い危険領域が存在するという事はロボットの大きなもう一つの特徴である。たとえばクレーンのように、危険領域が人間の作業域とオーバーラップする場合でも、それは人間の管理下にあり、災害の原因は操作ミスやワークの取扱いミスによるところとなる。これに対してロボットの危険領域は人間の意思を離れて動くロボットの腕の可動領域であり、さらに持っているワークを放出する可能性も考慮すれば危険領域はさらに広がるであろう。産業用ロボットに関連する危険領域内での人手作業は、従来型の機械に増して危険性が高いと考えねばならない。

危険領域という言葉は日本工業規格の産業用ロボット関連用語（JIS B0134）によると、「その中に立ち入った場合に危険な状態が起こるおそれのある領域」と定義され、具体的にどの領域であるかが示されていない。

危険領域の具体的提示は、産業用ロボット関連用語の国際的標準化を目指したISOへの西ドイツ提案書の中に見られる。これによると図2に示すように、危険領域（Danger space）はロボットの可動部を含み込む可動領域の周囲に安全な余地を見込んだ領域とされている。加工物の放出のおそれがある場合はそれを危険領域内で阻止できるよう防護柵等が設けられておれば、この領域を危険領域とするのは大変説得力のあるよい提案だと思われる。

3)

産業用ロボット工業会が行った災害調査によると、次の4件の災害事例が得られた。

- (1) ロボットが持っているワークと治具の間に指をはさまれた（定常運転の上下動作中）
- (2) ロボットが持っている薄肉鋼板に手を接触して切傷を負った（定常運転旋回動作中）
- (3) ロボットの腕が人間の体にぶつかって打撲傷を負

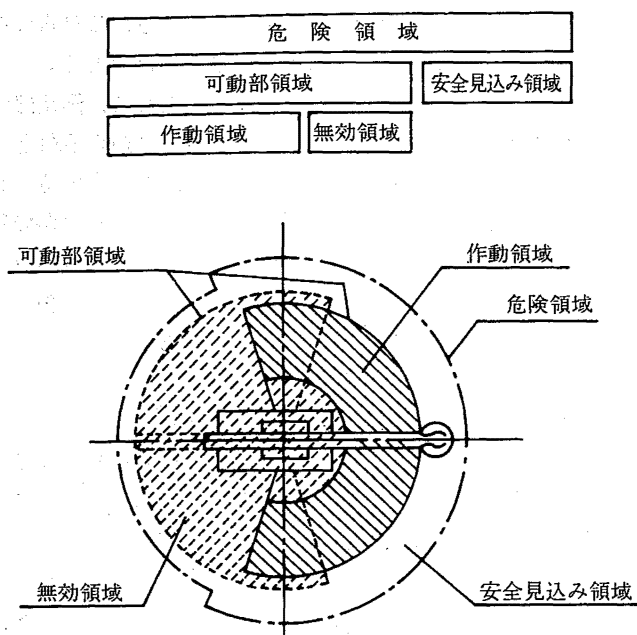


図2 産業用ロボットの危険領域の定義
(西ドイツからのISOへの提案)

った(定常運転旋回動作中)

(4) ロボットを調整中、ロボットのアームが誤動作して頭に切傷を負った(手動運転停止状態)

その後の調査で筆者らはいくつかの災害事例を得ているので、実際にはもっと多くの災害が発生していると考えなければならない。

4)

スウェーデンに同じような調査がある。これはスウェーデン鉄鋼労働組合を対象として、1976年1月から1978年6月までの30ヶ月間で発生したロボットによる事故のアンケート調査である。同組合には約270台のロボットが稼動中であつたが、その30ヶ月間に15件の労働災害が発生したとしている。事故の内容について個々に紹介されていないが、自動運転中に作業者が安易な気持ちでロボットに近接したための災害、ロボットの誤動作による打撲災害、手動操作でのボタンの押し間違いによる打撲災害、ロボットの手部にとりつけた工具による切傷災害などがロボットによる災害の典型だと分析している。

スウェーデンではこの調査結果を受け、災害は少ないと結論している。しかし災害頻度という点から見れば、この調査結果から、ロボットは約45台のうち1件の割合で毎年災害を生じていることになる。例えば最も災害の多いプレス機械であってもわが国では50台につき1件の割合でしか災害を生じていない。国状の違いがあつ

てそのままの比較はできないが、数字だけをとれば、ロボットはプレス機械より災害発生率が高いことになる。

表2は先に述べたロボットによる災害のアンケート調査の中でヒヤリ事故を経験したとする18件の原因をまとめたものである。これによると、ロボットによる危険性は、ロボット自体の故障が原因のものと、人為的なものが原因のものとがほぼ半々であることは注目すべきである。さらに定常状態で動いているときの事故は全体の22.4%で、自動運転のときの事故の66.4%に比べて少ないとは言え、自動機械としては少々多すぎるように思われる。ロボットにおいては人間が多く介在して、有能とは言えない現在のロボットを人間が回りから何とか補っているというロボット利用のパターンがうかがいあがってくる。

表2 産業用ロボットによるヒヤリ事故

原 因	割合(%)
通常運転中のロボットの誤動作	5.6
通常運転中の周辺機器の誤動作	5.6
人間が不用意にロボットに接近	11.2
教示・テスト運転中のロボットの誤動作	16.6
教示・テスト運転中の周辺機器の誤動作	16.6
手動運転中の誤動作	16.6
点検・調整修理時の誤動作	16.6
そ の 他	11.2

これらの災害調査などから、おおむね次のようなことが言える。

(1) ロボットを扱う企業のほとんどがロボットの持つ危険性を周知している。

(2) ロボットの危険性は、マニュアル運転で多くを占める。

(3) しかし、ロボットでは、自動運転での定常作業中に誘起する危険性が、他の自動機に比べて著しく高い。

(4) ロボットの危険性は、ロボットの故障に起因するものが全体の約半数を占めており、他の自動機械に比べて、故障が災害の原因になる割合が大きい。

(5) ロボットは、設計、製造時における本質安全化、フルプルーフ化は確保されておらず、その安全化はむしろユーザの利用技術に期待せざるを得ない。

3. 産業用ロボットの潜在危険性の同定

災害を発生させる可能性のある条件を解析し、その危

険性を評価するには、実際に発生した災害の統計的処理や分析によるのが最も直接的である。

しかし、産業用ロボットにおいては統計処理が可能なほどの災害データは手元にないため、ヒヤリ事故データ、ロボット利用職場のヒヤリング調査なども参考にしながら、システム工学的潜在危険同定解析法を用いることにより、人間-ロボット作業システムの災害危険性評価を試みた。

3.1 人間-ロボット作業システム

産業用ロボットに関連して人間が行う作業は、運搬、設置、段取り、調整作業はもとより、ロボットが自動運転されている間にも、ロボットやそれを含むシステムに付随した作業が存在し、また、ロボット特有のプログラミング作業（教示作業）も存在する。そこで、潜在危険の同定を行うために、当該作業システムの作業分類を行う。そして、それぞれについて、ロボット特有の形態を呈するものにあっては説明を加えることにした。

A. 運搬・設置作業

ロボットは、それが片持持りの構造を持つことから、重心が本体の中心になく、また腕の位置によって変化する。また極端には、アンカーボルトによって床面に設置されるまでは直立させておけないものもある。アンカーボルトがないと立ってられない機械はこれまで全く見られなかったと言えよう。さらに自由度の高いロボットにあっては運搬の際に安定性がわるく、腕がロックされていないと非常に扱いにくいものである。運搬作業時にこれらの点に配慮すべきである。

B. 段取り・調整作業

ロボットの停止位置を設定するための、リミットスイッチやショックアブソーバ、ストッパなどの位置決め作業は時として、高所作業となる場合があり、しかも、微調整を行ったり、試行錯誤を必要とする場合が多い。このように高所で位置決めするといった作業も従来型機械には余り見られなかった。これもロボット特有の作業と見なしてもよいであろう。

ハンド（グリップ）などの着け換えや、他の機器とのシステム結線作業、防護柵の設置作業等は、ロボットの電源を遮断した状態で行う場合はさほどの問題はなからう。

しかし、ゲイン調整、オフセット調整、補償回路調整

などはロボットを活かして行うものであり、これらの作業は危険性を含んでいることを認識すべきである。

また、ロボットによる作業の変更に対して、例えばすでに収録されてあるカセットテープを取り換えるなど、ロボットの動作プログラムを変更する必要を生ずる。この作業は変更しに則したプログラムがセットされたかの確認を含むが、場合によってはパート作業員に委ねられることもあり、この場合、全く無関係のプログラムがセットされたときの危険性を考慮すべきである。

C. プログラミング（教示）作業

行わせるべき作業をロボットに予め教え込む作業であり、その方式としては、(a)数値制御用言語によるプログラミング方式、(b)ピンボードによる方式、(c)設定用ポテンシオメータとシーケンサの組み合わせによる方式、(d)ティーチングボックスによる方式、(e)直接ロボットの腕をもって動かす、ダイレクトティーチング方式などがある。

いずれの方式においても、パワーの大きなロボットの腕の動きを教示するものであるから、安全上重要な意味を持つが、これらのうち(d)、(e)は他の機械に見られないロボット特有の作業であり、特に(d)は多くの押ボタンを操作してロボットを動作させながら行うといった密接な人間-ロボット系が構成されている。この教示作業は特に注目すべき安全上の問題を提起していると言える。

このティーチングボックスによって行う教示作業は、精神的に過度の疲労を伴う作業である。ヤードによれば、教示作業を長く行くと、それによる疲労によって操作ミスが起きやすくなるので、連続して行う教示作業は最高1時間とすべきであるとしている。

その他、(b)の場合のように、ピンを引き抜くといったちょっとした行為で容易にプログラムを変更できるものにあっては、それがロボットの異常動作となり危険であるため、操作盤面上のプログラムや設定はみだりに変更できないような的確な管理が必要である。このことは(c)の中に該当するものもある。また、(d) (e)のようにいわゆるプレイバックロボットにおいても、可変速用つまみを不用意に動かすなどのないよう的確な管理を必要とするものである。

D. 試し作業

これは、教示作業終了後、ロボットの動作が意図したとおりになっているか「チェック」などのボタン操作によって試し動作させるものである。

教示作業は十分低速で行ったり、ワークを持たない状態で行ったり、またアーク溶接では溶接ワイヤに電流を流させない状態で行ったりするため、そのまま自動運転に切換えるだけで十分な作業をロボットにやらせられるわけではなく、誤差の修正、電流調整などがこの試し作業に含まれる。ここでは定常速度の動きの中で、精度を要する位置に作業者の目を近づけるといった緻密な人間—ロボット系が構成されており、この場合の危険性とその安全対策については特に検討を要する。

E. 起動操作とその付随作業

ロボットを起動する前に準備作業がある。電源のオン、油圧ポンプ起動、ロボットアームの原点復帰操作などを行い、油圧、油温、起動時の異常などが自動チェックされて初めて「準備完了」の状態となる。

この状態から、運転切換スイッチを「自動」に切換え、起動ボタンを押すことになるが、その時重要なことはロボットの危険領域に危険な状態はないかを明確に確認することである。災害事例が示すように安易な起動操作は危険である。

F. 自動運転付随作業

これは、ロボットが自動運転されている間の加工物の取付け・取はずし、周辺機器の旋盤などの切削屑処理やバイトの交換、コンベア上のワークの処理作業、検査作業、監視などが含まれる。これらは直接ロボットに関連した作業ではないが、ロボットにより生産ラインが構成される場合（典型的には天井走行型のロボット）、これらの人手作業域が、ロボットの腕の到達域とオーバーラップすることがあり、ロボットの危険性から人間の安全

を確保する必要がある。

溶接用ロボットではチップドレッシング作業がある。これはロボットを停止して行われるものであるが、一般に回数が多く自動運転の付随作業とみなしてよいであろう。

G. 異常処理作業

ロボットの停止には、(a)非常停止ボタンによる（非常停止）、(b)一時停止ボタンによる（一時停止）、(c)異常検出による（異常停止）、(d)暴走による（暴走停止）、(e)条件待ちによる（条件待ち停止）、(f)プログラム終了による（作業終了停止）、(g)定点位置制御による（見掛け上停止）などに分類できる。

また、その停止の仕方には(イ)電源の遮断、(ロ)駆動用電源（油圧源を含む）のみ遮断、(ハ)サーボ用電源のみ遮断、(ニ)停止保持（ホールド停止）、(ホ)暴走時のストッパ停止などがあり、上記 a～f はこれらのいずれの停止の仕方に対応するかは、各メーカーによる設計思想の違いから、表3のようにばらつきがある。非常停止一つをとっても、近年、サーボブレーキによる急速停止の方式が採用されるものもあり、ここではもはや非常停止は従来の機械のように動力遮断装置をオフにするという考えが成立たなくなっている。このように、ロボットはこれまでの安全技術をそのまま適用できない特殊性を多く持っており、現実のロボット技術をふまえた高度で新しい安全技術の開発が必要である。

高級なロボットであると、数10点に及ぶ検出器がロボットの制御、駆動系を監視しており、ロボット内に異常があった場合、あるいは周辺機器からの異常検出信号を受けた場合は自動停止（異常停止）するようになって

表3 ロボットの停止の種類とその状態

状 態 種 類	イ. 電源遮断	ロ. 駆 動 用 電源遮断	ハ. サーボ用 電源遮断	ニ. ホールド 停 止	ホ. 特に対処せず
a. 非 常 停 止	◎	○	○	○	
b. 一 時 停 止			○	◎	
c. 異 常 停 止	○	○	◎	◎	
d. 暴 走 停 止					○
e. 条件待ち停止		○		◎	
f. 作業終了停止	○	○	○		
g. 見掛け上停止				○	

いる。しかし、この検出網にひっかからない異常（検出器自体の故障も含まれる）の際に、人間が意識的に停止させるのが非常停止である。ロボットのポジション部に挟まれなかった作業者が非常停止によって助かったとする事例もあり、非常停止の機能は安全確保の最終的手段として重要である。

a, c, d（時にはb）による停止時に、トラブル処理や調整などのためロボットの腕の到達域に作業が入る場合がある。この場合の停止の仕方のうち、ホ（時にはハ）においては、後述するロボットの信頼性の問題点と関連して、ロボットの不意の起動による災害危険性が考えられる。

空圧式ロボットの腕が周辺機器などにひっかかって停止している状態では、そのトラブル処理には空圧を解放して行うことは従来型の機械と同様、重要な安全対策である。

a～gのうち、停止がそのまま安全とみなされない顕著な例はeとgである。この両者はロボットが自動の状態にあり、ロボットの起動は人間によらずに他の手段で行われるからである。

災害事例2が示すように、ロボットが停止している間に何らかのトラブル処理をしてしまおうという安易な考えは危険である。このような不安全行為は、生産ラインが大きくなればなるほど、生産への影響から非常停止によるライン停止をかけにくくなることも大きな要因であると考えられる。

H. ロボットの修理・保全作業

ロボットの修理・保全作業や、ロボットの腕の到達域で行われる周辺機器の同様の作業は、ラインを構成する一般の自動化機械と同様、狭い空間で無理な姿勢で行われることが多い。この中には、上記の調整作業も含まれる場合もあり、鉄腕を持つといった特殊性のあるロボットにあっては修理・保全作業に、従来型の機械にも増して安全が考慮されていなければならない。

3.2 産業用ロボットの信頼性

ロボットにおいて、特に信頼性という観点から問題となるのは制御系の故障やノイズによってロボットが予想できない動きをする、いわゆる暴走である。そしてもう一つは把持している加工物を放出するといったたぐいであろう。

ロボットのトラブルの代表的なものとして、Z自動車

工場⁷⁾でまとめたものがある。これによると、

○ ロボットを使って教育訓練中に旋回軸が指定以外の方向に急に旋回した。

○ 作業終了後油圧源を切ったときロボットの腕が急上昇した。

○ ロボットが教示しておいた動作以外の動作をした。

○ ロボットの電源を入れたらインターロックの条件が整っていないのに動作をはじめた。

○ 単独操作時、車種指示を間違え、そのため被溶接物を破損させた。

○ 電源を入れたら急にロボットの腕がのびて、旋回軸が回転し、溶接機と干渉して停止した。

○ 夏期平常作業時に急にロボットの腕がはね上った。

工場ではこのような不意に起動するといったトラブルを年に十数件経験すると言われるが、これらの原因は、油圧バルブの故障、サーボバルブの故障、エンコーダ関係の故障、プリント基板の不良や異常、さらに人間による判断・操作などのミスが主たるところであると報告している。

ロボットのトラブルについては昨年9月に日経メカニカルが行ったアンケート調査がある。ロボットのトラブルを示す表4(a)によると、マイコンを含む電気回路系の故障が最も多く、治具などの不具合がそれに次いでいる。同表で言う暴走とはノイズなどによる再現性のない誤動作を示しており、決して少ない数値ではない。

さらに、同調査でまとめた表4(b)に示すように、MTBF（平均故障間隔）は75.1%が1000時間未満であり、さらに100時間未満が全体の28.7%とかなり高い比率を占めていると報じている。

ロボットメーカーの中にはロボットの信頼性は大きく向上したとの主張もある。しかしそれも高々MTBF 2500時間であり、ましてやそれがユーザにわたりシステム化されると相当トラブルの多い機械となってしまう。現状では、ロボットはまだ十分な信頼性が確保されていないことをよく認識しなければならない。T自動車工場⁹⁾でまとめたロボットの故障の内容の事例を表5に示す。

3.3 産業用ロボットによる災害の型の同定

システム工学的潜在危険同定法においては、まず、発生する災害についての型について検討を行う。この型の第一義的分類として、「エネルギー変換型」と「エネルギー欠損型」があげられる。

ロボットに関連した災害では、「エネルギー変換型」の

表4 ロボットの信頼性

(a) ロボットにおけるトラブル		(b) ロボットの平均故障間隔(MTBF)	
制御装置の故障	66.9 %	100時間未満	28.7 %
ロボット本体の故障	23.5	100～250時間	12.2
溶接ガンなどツール部品の故障	18.5	250～500時間	19.5
暴走	11.1	500～1000時間	14.7
教示など操作上のミス	19.9	1000～1500時間	10.4
精度不足・劣化	16.1	1500～2000時間	4.9
治具などの不具合	45.5	2000～2500時間	1.2
その他	2.55	2500時間以上	8.5

表5 スポット溶接ロボットにおける故障

No.	項目	内容
1	途中停止	過電流・干渉等, 制御上の異常検出による停止
2	ティ칭ング	打点位置の修正
3	電気関係	電気機器の故障
4	油圧関係	サーボバルブ, シール, 配管等
5	2次ケーブル	溶接トランスからガンまでのケーブルの損傷
6	ガン	溶接用ガンの故障
7	ホース	ガン加圧用エアホース, 冷却用ホースの損傷
8	本体	シャフト, ギヤ, カバー等
9	その他	上記以外の(溶接機, バランサー, トロリー等)

災害に分類されると考えてよいであろう。エネルギーについてはMORT¹⁰⁾に従うと、(1)ポテンシャル、(2)機械的、(3)化学・生物学的、(4)熱的、(5)放射の5つのエネルギーに分類される。すなわち、人間-ロボット作業システムにおいては、システム内に保有されるエネルギーが、人体に危害を加える型に変換されることにより災害が生ずることになる。

そこで、当該同定手法に従い、作業システム内に含まれる潜在的に危険なエネルギーのそれぞれについて検討を加えることによって、災害の型の同定を行った。

その結果を表6に示す。ここでは、ロボットに係わる作業のそれぞれに関連すると予想される災害の型に○印を、また、関連が特に深いと思われるものに◎印を記入

した。

また、ロボットは色々な使われ方がされるため、爆発物、危険・有害物、高温・低温物、放射性物質などを扱う場合や、さらに特殊環境下で作業する場合も考えられる。これらによる危険性は対象作業の形態などにより大きく変わるため表6には記入していないが、実際の適用の際には十分な検討を要する重要な安全上の問題となろう。

以下、それぞれのエネルギーに従って説明を加える。

3.3.1 ポテンシャルエネルギー

(1) 位置エネルギー

人間-ロボット作業システムに関連して、作業員自身に含まれる位置エネルギーによって、高所からの墜落・転

表6 マン-ロボット作業におけるエネルギー源の人体への作用

エネルギー源	人体への作用の型 (災害の型)	潜在危険のあるロボットの関連作業							
		A 運搬設置 作業	B 段取り 作業	C 教示作業	D ためし 作業	E 起動時 作業	F 自動運転 付随作業	G 異常処理 作業	H 保全調整 作業
1. ポテンシャル									
(イ) 位置の	1-1 墜落・転落	○	○			○			○
	1-2 転倒	○	○	○	○		○	○	○
	1-3 落下物にあたる				○	○	○	○	
	1-4 倒壊物にあたる	○			○	○	○	○	
(ロ) 電氣的	1-5 感電		○	○	○	○	○	○	
(ハ) 高圧の	1-6 破裂			○	○	○	○	○	
2. 機械的									
	2-1 飛来				○	○	○	○	
	2-2 激突・あてられ	○		○	○	○	○	○	○
	2-3 はさまれ	○		○	○	○	○	○	○
	2-4 切れ・すりむき・ひかれ	○	○	○	○	○	○	○	○
	2-5 まきこまれ		○	○	○	○	○	○	○
	2-6 切れ		○	○	○	○	○	○	○
3. 化学・生物的									
	3-1 爆発								
	3-2 危険・有害物との接触								
	3-3 音波の被爆								
	3-4 無理な動作	○	○	○	○		○	○	○
4. 熱的									
	4-1 異常高低温物との接触								
5. 放射的									
	5-1 紫外線・赤外線 ¹¹⁾ の被爆								
	5-2 放射線の被爆								

落および転倒災害が発生する可能性がある。特に大型の天井走行型（直角座標型）ロボットでは、アームの停止位置の設定を高所で行う場合があり、これらの災害の危険性がある。

また、一般機械と同様、すべる、つまづくなどにより作業者が転倒する可能性も考えられる。

さらに、ロボットの転倒による災害も考えられる。特にロボットのように片持はり的な構造をもつものにあつては、重心の位置が一定せず、ロボットの設定時、起動・停止時、または可搬重量を越えた重量物を把持させた場合に、倒壊する可能性が考えられる。また、地震時の倒壊の可能性も考慮されるべきである。

さらに、ロボットが把持しているワークがロボットの手を離れて自由落下する危険性を考えねばならない。

(ロ) 電氣的エネルギー

ロボットの電気配線やコネクタ部の露出や漏電等による感電災害は一般機械に共通して考えられるが、ロボットの場合、可動部を持つため、ロボットの手先に取付けたスポット溶接用ガン、アーク溶接用ホルダ、溶接ワイヤや他のツールなどに供給する電気配線は著しく振れ、引張りを受け劣化しやすいと言える。

また、電氣的エネルギーが直接人体に危害とならなくとも、信号線の断線・短絡などがロボットの誤動作を生じさせ、後述する機械エネルギーによる災害を誘発させる可能性がある。

また、電氣的火花が、火災や爆発の原因ともなりうる。

(ハ) 高圧エネルギー

油圧・空圧ホースなどの破損により、ホースのむち打ち現象を生じ、作業者が打たれることがある。

3.3.2 機械的エネルギー

ロボットが把持しているワークを放出し、近くにいる作業者に飛来することがある。この現象はロボットに可搬重量を越す重量物を持たせたり、把持しにくいワークを持たせたりすることによって発生する。特に、筆者らの研究によれば、ロボットの手として一般に使用されている真空・磁気吸着パッドなどでは、ワーク表面に付着するオイルによって容易に放出現象を生じることがわかっている。ワークの放出は、ロボットの腕が何かに衝突したり、非常停止時などでの急停止時においても発生しやすい。

ロボットの腕や肘部などによって、作業者が激突、挟

撃、引っ掻き、切れ・こすれを受けることがある。これは、作業者が駆動エネルギーを持った状態でロボットの危険領域にいる場合は常にその危険性があると考えなければならない。

挟撃は、ロボットと周辺機器の間に生ずる以外に、ロボット単体の構造上の問題から生ずる場合もある。特にリンク機構を持つロボットでは、この部分が挟圧部となる可能性があり、しかもカバーが出来ないという特殊事情がある。

また、ロボットに押されて旋盤の回転部に巻き込まれる等、システムとしての災害も考慮すべきであろう。

3.3.3 化学的・生物学的エネルギー

塗装作業など可燃物の爆発限界内雰囲気での作業時にロボットが着火源となって爆発する可能性がある。この着火源は、電気的火花や機械的摩擦が考えられる。また、可燃性作動油による火災も考慮しなければならない。

危険物・有害物を扱うロボットでは、ロボットの誤動作や作業者の誤操作・不安全行為などによって、危険な状態となる場合も考えられる。

作業のロボット化によっても人間による作業の適切配慮が欠けている場合は、腰痛、振動傷害、難聴などを生ずる可能性も考えられる。

3.3.4 熱的エネルギー

鋳造、熱間鍛造、熱処理などを行うロボットでは、ロボットの誤動作などによって作業者が高温物質に接触して傷害を受ける可能性がある。また低温物質を扱う場合も同様のことが言える。

3.3.5 放射エネルギー

放射能、赤外線、紫外線などの放射性物質を取り扱うロボットにおいては、それらのエネルギーの影響を作業者が受ける可能性がある。

4. 産業用ロボットによる災害のFTAによる検討

前節まででは、人間-ロボット作業システムにおける作業者が行う作業の種類と、それに対応する災害の潜在危険について帰納的に同定してきた。

この潜在危険は、人間-ロボット作業システム内に発生する「不安全状態」と「不安全行動」の各要因が、いくつかの連鎖や結合を行う結果として発生するものである。

これらの「不安全状態」と「不安全行動」の各要因間の結合条件および因果的な論理構造を、演繹的に求めてみよう。

このような目的を達成する手段としてよく知られているF T A¹²⁾(フォルトツリーアナリシス：欠陥樹解析)法がある。この技法を用いて、人間-ロボット作業システム内における災害発生のプロセスを解析したものが、図3である。

ここでは、特にポテンシャルエネルギー及び機械的エネルギーによる災害のようにロボットの特徴的な機能や構造から生ずる災害を中心にしてF T Aを行った。しかしロボットは色々な使われ方があり、対象の機械、扱うワークやツールも多岐にわたり、したがって扱うエネルギーも広がってゆくのであるから、ここでは十分触れられていない熱的エネルギー、化学的、生物学的エネルギー、放射エネルギーによる災害も十分検討し、安全対策を盛込んでゆくべきであろう。

5. 産業用ロボットの安全化

人間-ロボット作業システムに含まれる危険性を以上のようにF T Aにより検討した結果、それらの危険性を減らすために有効と思われる対策の概念と今後それらをさらに具体化してゆくための研究などは以下になるろう。

a. 異常なエネルギー変換のチャンスを減らす。

これは、ロボットのハード的な信頼性向上と、作業者の操作上の信頼性向上によって達成される。後者は作業者の専任制や十分な訓練および操作パネルの人間工学的改善と標準化に期待するところである。

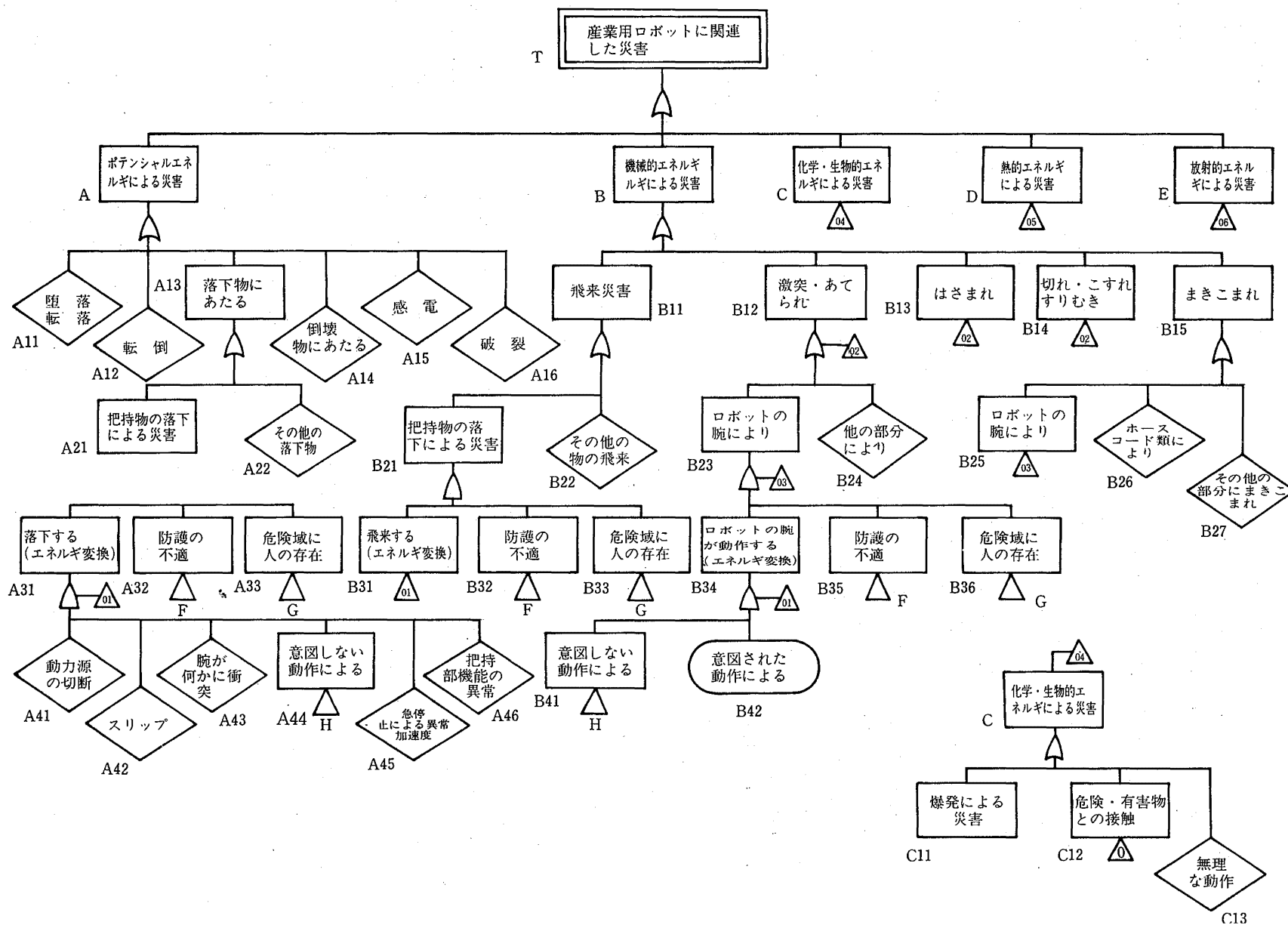
ロボットにあっては非常停止の際に必ずしも電源遮断が行えないことを先に述べたが、電源が活きている限り暴走の危険性がある。非常停止機能の信頼性を確保する研究が必要である。

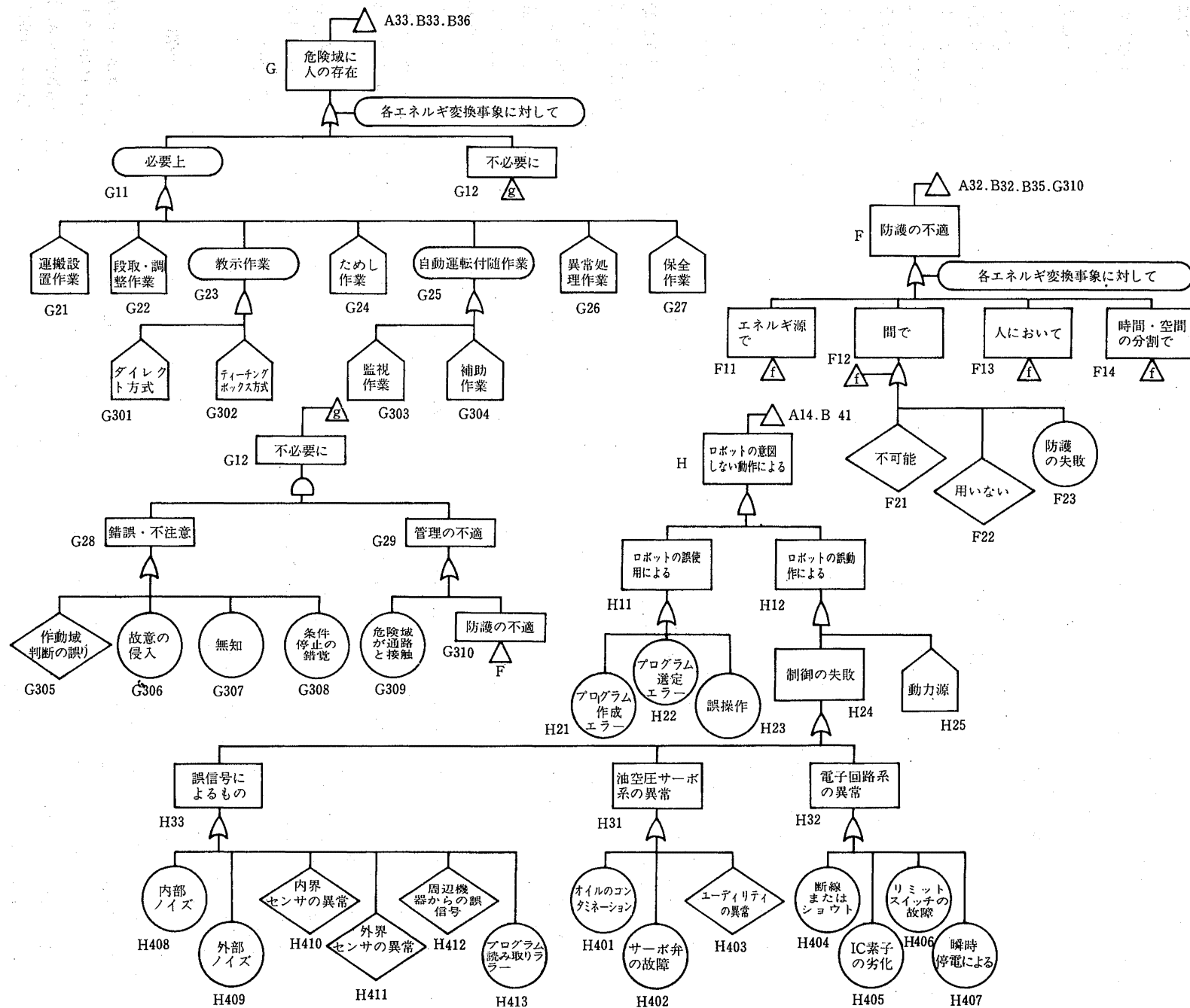
また、運用側から、ロボットの危険領域に入って行う作業をできる限り少なくすることも考えねばならない。

b. 異常なエネルギー変換を小さくする。

これは、特に教示作業など、作業者がロボットに接近して行う作業では、ロボットの動作速度を低く抑えることによって、危険性を小さくすることを意味する。また、負荷を常時監視し、定常負荷と異なる負荷を検出した場

図3 産業用ロボットによる災害のFT





合にロボットを停止させるなどにより、作業者を挟撃災害から未然に防ぐ手段も考えられる。

これらの場合、教示速度、挟撃負荷などは、人間工学的な検討により決定されねばならない。これらの決定は今後の大きな課題である。

c. 防護機能を適正化する

F T Aの解説の項で概説したように、各種の具体的な防護手段や処理が必要である。これらは、安全柵と安全プラグ、機械的ストッパ、光電型・静電型・超音波型・レーザ型・モニタ型など人間侵入を検知するセンサ、および各種異常検出器など多種のものが考えられるが、^{13), 14)}それぞれの構造や機能は今後大いに研究されてゆくべきであろう。また、ライン化された場合の安全対策は別途考えてゆく問題であり、その研究はシステム工学的重要な課題である。

d. 管理を的確に行う

ロボットの危険性を認識して、人を極力危険領域に入れないようにすると同時に、オペレータ、教示作業員、保守・修理技術者だけでなく、ワークの取付け・取りはずしを行うパート作業員に対しても作業の安全についての教育を徹底することが重要である。

お わ り に

大手の自動車工場などでは産業用ロボットが未成熟の時代から導入が開始されたこともあって、多くのトラブルを体験している。そのため比較的徹底した安全対策がなされているようである。しかしこのようなトラブルや実際に起った災害が公表されておらず、産業用ロボットの安全利用に対するルールも存在しないため、安全対策は主観にまかされている状態にある。

しかも以下にあげるような理由から、ロボットの安全対策が急がれるのである。

- (1) ロボットが自動機械であることから、本来人間とのかかわり合いがないものと誤解されやすい。
- (2) 教示作業においては、人間がロボットの動作範囲に入る必要があり、これはロボットの駆動エネルギーを断ち切っては行えない。
- (3) 監視、工具交換、チップ研ぎ、検査などロボットまたはその周辺に付随作業が残存する。
- (4) ロボットの動作には十分な信頼性が確保されるに

いたっていない。

(5) ユーザによって使用状態が異なるため、メーカーだけでは本質安全化を確保できない。

(6) 周辺機器のトラブル処理のため、ロボットの動作領域に入る必要がある。

(7) 事故に関する情報が体系化されておらず、工場内の経験に頼っている場合が多い。

産業用ロボットの適用範囲の拡大とともに、ロボットの構造、機能もさらに進歩し、特に知能ロボットの技術開発は急速に進展するであろう。そうすると、ロボットはいよいよ人間にとっては全く予想のできない動きをとることになる。このようにロボットに知能が付加されるに従い、ロボットの活動範囲や自由度が高まってゆくと、人間-ロボット系における安全問題が極めて重要になってくる。

ロボットによる危険の防止は、これまでのように人間に一方的に押しつけるのではなく、ロボットも人間の接近を検知して安全行動を取るようになってこそ人間-ロボット系の安全は確保されるであろう。

本技術資料によって、産業用ロボットの持つ潜在危険が明らかになったと同時に、安全対策を具体化する上で、いくつかの今後すすめるべき研究課題を提起している。例えば、教示作業時での安全速度、安全柵の設置方法、人間検出手段に応じた安全限界などは、ロボットと人間との相互の特性から決定されなければならないし、また、ロボットの持つ危険性は単体としてだけでなく、人間や周辺機器さらにコンピュータを含めたいわゆるシステム化に伴って生ずるものも少なく、したがって危険性の評価及びその安全対策はシステム工学的研究が必要となるであろう。

本技術資料に示した多くの情報を基にして、今後、ロボットの安全対策について研究をすすめてゆくつもりである。
(昭 57. 10. 22 受付)

参考文献

- 1) 森, 合田, ロボット, NHK ブックス (1978)
- 2) I S O 西ドイツ提案書 (1981)
- 3) (社) 日本産業用ロボット工業会, 「ロボットの標準化に関する調査研究」(第Ⅱ報), p 50 (1976-3)
- 4) J. Carlsson, "Industrial robots and accidents at work", TRITA-AOG-0004, 1979 (スウェーデン)
- 5) 井上編訳, 「ハインリッヒ産業災害防止論」,

p 119 - 129 (1982), 海文堂

6) G. Garde "Skyddsanordningar vid användning av industrirobotar, Verkstaderna nr. 4, 1978

7) 島, 「産業用ロボット導入に伴う安全管理について」, 安全, Vol 33 - 3, p18 (1982 - 3)

8) 日経メカニカル, 9 - 28 - 1981, p 62 (1981 - 9)

9) 佐藤, 「スポット溶接ロボットの保全事例」, プラントエンジニア, Vol 14, p28 - 32 (1982 - 3)

10) W.G. Johnson. "The management oversight and risk tree - MORT", SAN 821 - 2, U.S. Atomic energy Commission, 36 (1973 - 2)

11) 杉本, 「吸着パッドの安全設計」, 図解メカニカルハンド, p 60 - 65, 工業調査会 (1981 - 12)

12) W. G. Jonson, "MORT Safety Assurance Systems", p 25 - 39, MARCEL DEKKER INC. (1980)

13) H. Moldau, "Sicherheit am Arbeitsplatz Industrie - Roboten, Proc. of the 8th International Symposium on Industrial Robots, Stuttgart 30. 5. 1978 - 1. 6. (1978)

14) 杉本, 「産業用ロボットの安全問題とその対策」, 省力と自動化, Vol 13 - 9, p 46 (1982 - 8)

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-82-1

昭和 57 年 12 月 20 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所
東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号
電 話 (03) 453-8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 007.52:007.2:005:614.8

産業用ロボットの危険性とF^oT^a

川口邦供 杉本旭 佐藤吉信 袴塚禎三

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-82-1 (1982)

産業用ロボットに起因する災害やヒヤリ事故例が検討され、ロボットの安全上の問題点が明らかにされた。さらにロボットに関連する人手作業を人間-ロボット作業システムとしてとらえ、ロボットによる事故が「エネルギー変換型」であることから、そのシステムに含まれる各種のエネルギーについて考察し、ロボットの事故の型の同定がされた。さらにF Tによって解析評価され、原則的な安全対策の方法が論じられた。

(図3, 表6, 参14)

UDC 007.52:007.2:005:614.8

Safety problems with Industrial Robots and FTA

by K. KAWAGUCHI, N. SUGUIMOTO, Y. SATO and T. HAKAMAZUKA

Technical Note of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-TN-82-1 (1982)

Today more than 90000 robots are used in Japan.

The robots, of which reliability is not enough, and around which there are a lot of manual operations, poses some safety problems.

In this study, manual operations practiced by workers in relation to robots were first classified. And according to the classification types of expected accidents caused by robots were identified. And lastly, causation of robot accidents was deductively analyzed by means of Fault Tree.

(3 figures, 6 tables, 14 references)