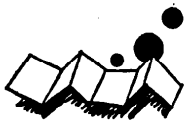


解説



ロボットの安全性技術†

伊藤 潔†† 高橋 浩爾†††

1. はじめに

ロボットは、他の機械や設備と著しく異なる運転上の特性をもつ。すなわち、ロボットは、ロボット自体のベース位置からはみ出して、高速にかつ大きな空間内を動きまわる能力をもつ。このため、万一人に接触すると大きな事故を引き起こす。ロボットの腕の動きのパターンや速度を、ロボットの製造時に前もって規定できればよいが、ロボットの用途や使用環境によってそれらは大きく異なるために容易ではない。そのため、用途や使用環境に応じた安全防護策 (safeguarding) を施す必要がある。

人を常にロボットのそばから隔離できればよいが、現在の技術水準では、教示者や保守要員が、ロボットの腕に動力が効いている状態でロボットのそばの空間内に立ち入る (access) ことが必要となる場合が避けられない。また、ロボットの実際の据付けの状況によっては、あるロボットの空間が、他のロボットや機械の空間と重複している可能性が高い。この場合にはさらに、危険が増大される可能性がある。

人に対する危険 (hazard) は、ロボット自体、ロボットと他の装置との関連、あるいはロボットシステムと人との相互作用から起きる可能性がある。危険に対する安全防護策として、ロボット自体の設計と製作、ロボットシステムとしての用途別の設計と組み立て、教示、運転および保守の各項目について、安全装置の導入と安全作業手順の確立が必須となる。

ISO/TC 184/SC 2 では、産業用ロボット (manipulating industrial robot) に関して、用語、特性と試験方法、安全性、言語、メカニカルインタフェースなどについて標準化作業を現在進めている。安全性

(safety) についてはこの SC 2 の WG 3 が分担し、日本がその幹事国となり、筆者らは議長団としてこれを運営している。本解説では、WG 3 でのこれまでの審議内容¹⁾を踏まえ、またロボットの安全性に関する日本の JIS における安全通則²⁾について言及しながら説明を進める。

2. 対象と用語

ここで対象とするロボットは、産業用ロボットであり次のとおりに定義されている。

「工業用オートメーションの用途に用いられる、自動制御式で再プログラミング可能な多目的かつ複数自由度を有するマニピュレータ型の機械、移動機能の有無は問わない。」

ここで、再プログラミング可能とは、物理的な変更なしに、プログラミングされた動作やその他の補助機能を変更可能なことである。多目的とは、物理的変更により他の異なる用途に適合可能なことである。物理的変更とは、プログラミングカセット、ROM などの変更ではない、機械的な構成または制御装置の変更である。複数自由度を有するマニピュレータとは、マニピュレータが、伸縮、屈伸、上下移動、左右移動および施回の動作を、またはこれらが複合した動作を行う機械である。

産業用ロボットを組み込んだシステムをロボットシステムと呼び、次のとおりに定義している。

「ロボットシステムは、一台の産業用ロボットのハードウェアとソフトウェア、動力源と制御装置、エンドエフェクタ、ロボットの作業遂行に必要な装置・機器・センサ、ロボット・装置・センサを運転し監視するための通信インタフェースから構成される。」

現在 ISO/TC 184/SC 2 で標準化の対象としているロボットシステムは、上に示した一台のロボットとその周辺装置・機器一式である。複数台のロボットから成るロボットシステムについての標準化作業は、現在の作業の後に行われる予定となっている。

† Methodology for Robot Safety by Kiyoshi ITOH (Laboratory of Information Science, Natural Sciences Center, Faculty of Science and Technology, Sophia University) and Kohji TAKAHASHI (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Sophia University).

†† 上智大学理工学部一般科学研究家情報科学部門

††† 上智大学理工学部機械工学科

3. 安全防護策の基本事項

(1) 人に対する安全防護策 (safeguarding) は、ロボット自身とロボットシステムに装備した安全装置 (safety device) と、ロボットシステムの使用・管理についての安全作業手順 (safe working procedure) の両方で実現すること。

(2) ロボットが自動運転状態にある間は、人の安全防護空間への侵入を阻止する安全防護柵 (safeguard) などを設置したり、安全防護空間に侵入した者が傷害を受ける以前に、ロボットを停止させる (safety stop) などの機能をもたせること。

(3) 安全防護策には、作業員だけでなく、他の者に対する傷害を回避する機能をもたせること。

(4) 安全防護策に関するすべての装置や方策は、原則としてフェールセーフとし、信頼性を高くすること。

(5) ロボットおよびその周辺に装備した安全防護装置の機能を、低減させたり失わせたりしないこと。

(6) 改造・改善を行った場合は、新しい危険をとまなうおそれがあるので、必要な安全防護策を講じること。

4. 体系的な空間の導入

ロボットを用いた作業においては、ロボットに関わる次の5つの空間を明確に識別する必要がある。

(1) 可動空間 (motion space): エンドエフェクタとワークピース以外のロボットの可動部分が掃引可能な空間。

(2) 最大空間 (maximum space): エンドエフェクタとワークピースが掃引可能な空間を、可動空間に加えた空間。

(3) 制限空間 (restricted space): 最大空間の部分空間で、ロボットシステムに予測されるあらゆる故障が起きて、越えてはならない限界を定めるリミット装置によって制限される部分空間。

(4) 運転空間 (operational space): 制限空間の部分空間で、プログラムされた動作の実行中に実際に使われる部分空間。

(5) 安全防護空間 (safeguarded space): 安全防護装置、安全防護柵によって定められた空間。

ここで、エンドエフェクタとはロボットのアームの先端に付けられるグリッパやガンの総称である。

図-1 にこれらの空間の関係を表す。この図に示す

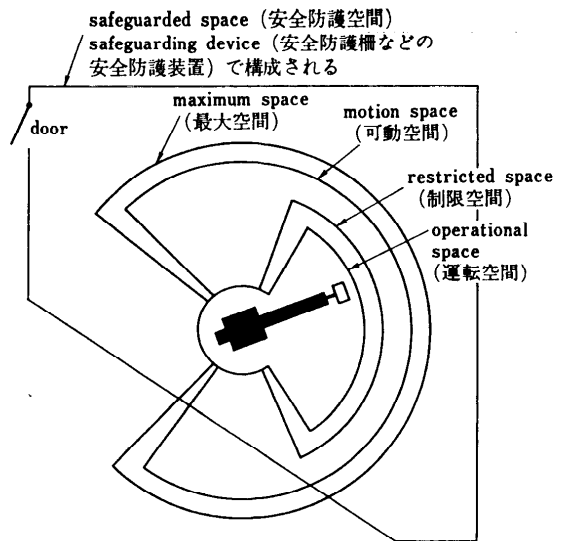


図-1 ロボットの空間

とおり、運転空間、制限空間、可動空間、最大空間の順に包含関係がある。

ロボットにある仕事を行わせるときには、ロボットの動作をプログラムとして与えて運転空間を規定する。次に仕事に応じたエンドエフェクタをアームの先端に取り付ける。さらに、ロボットの運転空間を越えたオーバランを物理的に阻止するリミット装置によって制限空間を構成する。

リミット装置には、電気式あるいは機械式ストッパがあり、運転空間の範囲に応じて取り外しや調節が可能であるが、ロボットの運転中は固定されているものである。この物理的なリミット装置に対応して、運転空間を構成する限界を日本では慣用的にソフトウェアリミットと呼んでいる。

運転空間や制限空間の床などには、その範囲を明確に示したマークを付ける必要がある。

制限空間が規定されると、その外側にワークピースやロボットの構成要素などの意図しない放出を阻止するために安全防護装置 (safeguarding device) によって、安全防護空間を規定する。安全防護装置には、安全防護柵やカバーがある。

この安全防護空間の内部に人が立ち入る場合があるので、制限空間の周りに十分な距離をとって安全防護空間を決定する必要がある。

5. 停止の識別

ロボットの停止状態の識別は安全作業手順の遂行のために重要である。ロボットの停止には次の4種類がある。

- (1) 運転停止 (programmed stop)
- (2) 生産停止 (production stop)
- (3) 安全停止 (safety stop)
- (4) 非常停止 (あるいは緊急停止)
(emergency stop)

運転停止は、ロボットに与えられたプログラムが正常に稼動し、プログラムが意図したとおりに終了したときの停止である。

生産停止は、ロボットがローディング装置などからワークピースを供給されて仕事を行っている場合や、他のロボットと協同して仕事を行っている場合などに、なんらかの原因のために、それらのローディング装置やロボットに故障が起きたことにより、連動しているロボットやローディング装置の動作を停止させて、ロボットや装置、生産物などの保全を図ることである。

安全停止は、ロボットが仕事を行っている最中に、人が安全防護空間の中に立ち入らなければならない場合に備えて、安全防護空間の入口のドアの開閉とロボットの運転を相互結合 (interlock) しておき、ドアを開けるとロボットの運転が自動的に停止することである。安全停止の補助的なバックアップ手段として、人がドアによらず安全防護柵を横切ったり飛び越えたりしたときに、ロボットを停止させる感圧マットやライトカーテンなどのセンサ群による存在検出装置 (presence sensing device)、およびこれに連動する警笛、点滅光、ベルなどの警報装置 (warning device) を装備させておくことが望ましい。

非常停止は、ロボットの異常な動作や人身事故を発見したときに、ロボットの動作を緊急に停止させることである。この非常停止が起動されると、ロボットを動かすすべての他のスイッチやつまみが無効になり、また、ロボットのすべての可動軸に対するアクチュエータへの動力が瞬時に遮断される。

6. 設計および計画段階における安全防護策

6.1 基本事項

ロボットおよびロボットシステムの設計および計画の段階においては、次の各項に基づく安全防護策を

施す。

- (1) フェールセーフ機能

(a) ロボットの誤動作による危険性を防止するため、異常を検出したらロボットを停止させる。

(b) 電圧、油圧もしくは空気圧の変動または停電、その他の異常時に、危険性を防止するためロボットを停止させる。

(c) 人の不用意な安全防護空間への侵入を検出してロボットを停止させる。(安全停止)

(d) 関連機器の異常時に、ロボットによる危険性を防止するため、また生産物の保全を図るためロボットを停止させる。(生産停止)

(2) ロボットおよび関連機器の異常によってロボットが停止した場合の外部への報知機能。

- (3) 動力遮断装置および非常停止機能。

(4) 保全、点検、調整、清掃などの安全作業手順。

(5) 安全防護空間内で行われる教示作業などの安全を確保するための、ロボットの安全な動作速度の設定機能。

(6) 必要な部分を除き、ロボットから挟撃、せん断、巻き込み、引っかき、切れなどのおそれがある危険部分の除去。

6.2 動力遮断装置

ロボットの動力遮断装置には、次の各項に基づく安全防護策を施す。

(1) 動力遮断装置 (スイッチ、クラッチ、油空圧制御弁など) は、他の機器と独立。

(2) 動力遮断装置を接触や振動などにより不意に作動させたり、復帰させない。

(3) 動力遮断装置を作動後、自動的に復帰させない。

6.3 非常停止機能

ロボットの非常停止機能には、次の各項に基づく安全防護策を施す。

(1) 非常停止機能には、人が非常停止押ボタンスイッチを操作したとき、ロボットを速やかに、かつ確実に制止させる能力を装備。

(2) 非常停止押ボタンスイッチは赤色とする。

(3) 作業者が作業位置を離れることなく、容易に操作できる位置に、押す、引っ張る、触れるなどの動作によって非常停止させる装置を設置。

(4) 非常停止機能は作動した後、自動的に復帰したり、人が不用意に復帰させたりすることができない。

6.4 操作盤

6.4.1 共通事項

ロボットの操作盤には固定形操作パネルと教示ペンダントがある。これらに対して共通的に次の各項に基づく安全防護策を施す。

(1) 操作盤の押ボタンスイッチ、つまみなどの機能または用途を、作業者が明確にかつ即座に識別可能。

(2) 操作盤には、押しやすい位置に非常停止押ボタンスイッチを装備。

(3) 二つ以上の操作盤を備えている場合は、それぞれの操作盤に非常停止押ボタンスイッチを装備。

(4) モード選択スイッチの操作により、ロボットを教示のモードに設定した場合、ロボットを自動的に安全な速度に設定可能。

(5) 運転始動スイッチは、無意識始動の危険を最小にする構造とする。

(6) 手動操作により各関節を独立に動作させる機能を装備。

6.4.2 固定形操作パネル

ロボットの固定形操作パネルには、次の各項に基づく安全防護策を施す。

(1) 固定形操作パネルは、安全防護空間の外に設置。

(2) 固定形操作パネルの押ボタンスイッチ（ただし、非常停止押ボタンスイッチを除く）やつまみなどは、他の者が不用意に動かすことができない構造とする。

(3) 固定形操作パネルにはモード選択スイッチを設置。また、モード選択スイッチは手動操作以外の方法でモードの選択および変更が不可能。

(4) 固定形操作パネルには始動スイッチを装備。また、始動スイッチの操作以外の方法で、ロボットの始動が不可能。

6.4.3 教示ペンダント

ロボットの教示ペンダントには、次の各項に基づく安全防護策を施す。

(1) 教示ペンダントを操作している場合は、その教示ペンダント以外から運転操作が不可能。

(2) 教示ペンダントには動作許可トリガ (enabling device) を装備し、教示のための動作を行わせる押ボタンスイッチは、動作持続スイッチ (hold-to-run control) とする。

(3) 教示ペンダントに接続する移動電線は、その

損傷による危険を防止するために必要な強度および耐摩耗性を有する。

6.5 入出力端子

ロボットの制御装置には、次の端子が設けられていなければならない。

(1) フェールセーフ機能および非常停止機能により、ロボットが運転を停止した場合に、停止状態であることを報知するための信号出力端子および関連機器の運転を停止させるための信号出力端子。

(2) 非常停止機能を実現させるための信号入力端子。

6.6 把持部など

ロボットの把持部などには、次の各項に基づく安全防護策を施す。

(1) 作業上必要な部分を除き、把持部などには、この（鋸）歯状または鋭利な縁・突起など危険部分がない。

(2) 把持部は運転中の停電、故障または非常停止による急激な停止に対しても、被把持物を安定して把持する構造とする。ただし、これが不可能な場合は、被把持物の危険領域外への放出を防ぐ安全防護柵を設けるなどによって、安全を確保すること。

7. 教示、保守、自動運転の安全防護策

ロボットに対して仕事を与える、すなわち教示するための一般的な方法は、ロボットのそば（安全防護空間の内部、あるいはさらに内側の制限空間の内部）でロボットに接続する教示ペンダントからプログラム（動作の順序、位置・速度の設定と変更を規定したもの）を与える方法である。この方法は、情報処理の分野の言葉の点からは、必ずしも妥当とは考えないが、これまで慣用的に「オンラインプログラミング」と呼ばれてきた。これに対して、ロボット本体とは分離したコンピュータでプログラムを作成し、これをプログラムカセットなどを媒体としてロボットに与える方法は「オフラインプログラミング」と呼ばれてきた。

大規模な生産システムのロボットにプログラムを与える場合などには、後者の方法が採られていることが多いが、規模の小さい場合にはほとんど前者の方法が採られている。また、後者の方法を採用していたとしても、現在のコンピュータの処理能力や表示能力の限界から、プログラムの開発においてプログラムの作成と簡単な検証は、ロボットと分離したコンピュータで行

うが、ロボットの動作の最終的な検証は、ロボットのそば、すなわち安全防護空間の中で行う場合がほとんどである。

このような現状において、ロボットのそばで行うオンラインプログラミング（この用語は ISO/TC 184/SC 2 で教示プログラミング (teach programming) と定義された）およびロボット動作の最終確認などの作業に対して、種々の安全防護策が必要となる。

教示プログラミングは次に示す方法のいずれかで行われるプログラミング形態であり、所望の動作はプログラムとしてロボットの制御装置内のメモリに蓄積される。

(a) 手動でロボットのエンドエフェクタを誘導して教示。

(b) 手動でメカニカルシミュレーティング装置を誘導して教示。

(c) 教示ペンダントを使用して教示。

教示ペンダントは、ロボットの固定形操作パネルに接続し、ロボットにプログラムを与えることができる（または動かすことができる）携帯型ユニットである。ロボットを少しずつ動かしながら、ステップバイステップにプログラムを作成した後、一連の動作をさせてプログラムの検証ができる。同様な教示機能をロボットの固定形操作パネルがもつことも多い。

教示ペンダントのスイッチやつまみ類は次のような2段階構成にすることが ISO/TC 184/SC 2/WG 3 で推奨されている。

(1) 動作許可トリガ (enabling device) : このトリガを押した状態のみで他のスイッチやつまみの機能が有効となり、離すと他は無効となる機構とする。このトリガ自体では、ロボットを動作させることができない。

(2) 動作持続スイッチ (hold-to-run control) : 動作許可トリガの作動の上に、他のおおののスイッチやつまみ類を人手によって作動中にのみ所望の動作が可能とし、それを離すと動作が停止する機構とする。

以上の一般的事項の考慮の下に、教示時の安全作業手順を列挙する。

(a) 教示者 (teacher) は、使用するロボットに関して訓練され、推奨された教示手順に精通していること。

(b) ロボットの教示を行う前に、教示者は、ロボット自体とその運転空間を眼で調べて、危険を引き起こす可能性のある外因が存在しないことを確かめる

こと。また、ペンダントの各教示スイッチの機能をテストして、適正に動くことを確かめること。さらに、教示を始める前に、すべての損傷や誤動作を修理すること。

(c) 空間内部に入る前に、教示者は、すべての必要な安全装置が備えられ、機能することを確認すること。

(d) 空間内部で教示が行われる場合、教示者のみが空間に入り、ロボットがその教示者のみの制御の下にあること。

(e) 教示の際に、ロボットの動作を引き起こす可能性のあるすべてのインタロック機構や外部からの信号に対して、ロボットが反応しないこと。

(f) 空間内の他の装置の動作が危険を引き起こす可能性があるならば、そのような装置の動作も教示者のみの制御の下にあること。

(g) 非常停止機能が正しく動作すること。

(h) ロボットのプログラムに対するすべての修正の記録は、保持され衆知徹底すること。これはプログラムの版 (version) の管理の問題であるが、現在のプログラムがどのような仕事を行うかを衆知徹底させれば、動作内容を熟知せずにロボットに接近する際の危険を回避することになる。

(i) 教示の際のプログラムの検証、すなわちロボットの動作の確認は、一般的に減速された安全運転速度の状態で行うこと。（この安全運転速度の最大値を 25 cm/sec とする意見が ISO/TC 184/SC 2/WG 3 で出ている。）

(j) ロボットの動作を全速（通常運転速度）状態で調べることが必要な場合には、動作許可トリガを使用すること。

(k) 教示ペンダントによる自動運転モードの選択は不可能とすること。

(l) 教示を終えて自動運転モードに入る前に、教示者は安全防護空間の外へ出ること。

ロボットシステムの保守や修繕を行う人に対する安全防護策も上記の教示時の防護策と基本的には同様である。ただし、この場合、ロボットシステム内の機器の損傷やワークピースの破片など、予期しないあるいは意図しない危険因子が存在する可能性があるため、一層の安全防護策が必要となる。

故障原因の識別 (trouble shooting) は、安全防護空間の外側のロボットの固定形操作パネルから行うことが望ましい。このためにはできるだけ多くの自動故

障診断 (diagnosis) 機能を用意しておく必要がある。

教示、保守、修繕後の自動運転モードでは、安全防護空間領域内に人がいないことが保証されなければならない。また、人が安全防護空間に侵入したときのロボットの安全停止機能が必要不可欠である。

8. おわりに

ロボットやロボットシステムの安全性について、ISO での審議内容や JIS の安全通則をもとに解説した。

ここまで述べたようにロボット使用における安全防護策は、適正な種々の安全装置の配備と安全作業手順の両方で実現される。これらは、一般にロボット導入の際のコストの上昇につながる。

人にあまり危害を与えないと考えられる機器の開発や導入の際には、一般にその機能と性能が評価尺度となり、設計や計画を進める。一方、ロボットなどの生

産機械の場合には、人に危害を与える危険性がきわめて高く、評価尺度として機能・性能に加えて安全性を大きく考慮する必要がある。その場合、この三つの尺度を同時に考慮して、開発や導入の際の設計や計画がなされなければならない。機能と性能はコストがらみでそれらのトレードオフが考慮されるが、安全性は単純なトレードオフの考慮では済まされない点に留意する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Draft of "Standard on Safety" by ISO/TC 184/SC2/WG3 Secretariat, ISO/TC184/SC2/WG3 N101 (訳:「安全に関する ISO 規格原案」日本産業用ロボット工業会) (June 1987).
- 2) 産業用ロボットの安全通則, JIS B 8433 (1986).

(昭和 62 年 11 月 2 日受付)