

ロボット介護機器のイミュニティ試験における停止性能判定

○池田博康（安衛研） 風間 智（安衛研）

1. はじめに

人間共存環境下で動作するロボット介護機器は、操作する介護者や利用する被介護者に対して危害を及ぼさないことが基本である。電磁ノイズ環境下であっても、外部からの電磁ノイズの影響により安全機能が損なわれることは許されない。特に、人と接触しながら停止しているロボット介護機器が、電磁ノイズによる妨害により、予期せぬ動作を生じて人を圧迫するような事態は避けなければならない。

そのため、電磁ノイズのイミュニティ試験の性能は安全に関する基準が規定されており、判定基準 A～C[1]、あるいは FS[2]によりランク付けされている。しかし、これらの判定基準は具体的な性能レベルには言及していないため、停止状態の性能維持目標が規定されていない。

本稿では、ロボット介護機器の安全な停止状態を定義して、停止性能の判定基準を提案すると共に、イミュニティ試験における停止性能判定方法を提案する。

2. イミュニティ試験の安全性能判定基準

一般に、機器に対するイミュニティ試験は、製品によっては個別に要求される規格もあるが、基本的に IEC61000-4 のシリーズ規格が適用され、機器使用環境に応じて各試験の条件や許容値が規定されている。そして、各イミュニティ試験項目に対して、性能判定基準 A～C が定められており、機器の品質確保を目的とした動作の継続性が評価される。

特に、機器の安全機能に着目した場合は、表 1 に示すようなより厳しい FS 基準が用いられる。IEC 62061 は機能安全規格であり、機械の制御システムは同表の 3 つのいずれかを満足しなければならない。

表 1 イミュニティ試験の安全性能判定基準

IEC 62061 の FS 基準	ロボット介護機器用 FS 基準案
仕様の範囲外でも機器は影響を受けない。	a. 機器が危険な動作をしない。
指定の状態を維持、または所定時間内に指定の状態を達成できるように反応すれば、妨害を受けてもよい。	b. 安全機能作動時に所定の安全状態に機器が移行できる。
指定の状態を維持、または所定時間内に指定の状態を達成できる場合は、構成部品の破損があってもよい。	c. 安全が確保されるならば、機器の障害は生じてもよい。

これを基に、生活支援ロボットを対象としたイミュニティ試験用に提案した安全判定基準案[3]を表 1 に併記する。この案は、ロボット介護機器においても同様に適用でき、a は電磁妨害により保護停止後の状態を維持すること、b は保護停止移行時の制動性能を規定することになる。

いま、最悪条件として人と機器が接触したままの保護停止状態を考えると、機器可動部は機械的に固定されてはいないため、外乱により微動する恐れがある。しかし、その動作が危険でなければ、それは「許される性能低下」と言うことができ、例えば、停止状態からの振れ（ふらつき）の許容幅が該当する。実際には、機器メーカーが安全停止の許容幅を予め規定していることはほとんどなく、また、安全停止状態自体の定義もしていないのが現状である。物理的な完全停止状態が定義されていないため、速度 0 から有限の速度あるいは変位が生じたことをいつどの程度の量で判断するのか、明確でない限り安全停止状態からの逸脱を測定できない。

3. 機器の安全停止の定義と安全停止条件

3.1 危険な機械機能の終止

産業用ロボットをはじめとする機械設備が完全停止するまでの時間は重要なパラメータの 1 つとされているが、機械の安全距離を決定するための規格[4]によれば、完全停止の前に「危険な機械機能の終止」という状態を定義している。これは人に危害が及ばない状態とされ、終止の時点を判断する要因として、人体に加わる力や運動エネルギー、接触される人体部位、接触する機械形状や材質等を考慮する。

この規格では、機械の安全距離を決定するために、機械の完全停止時間ではなく危険な機械機能が終止するまでの時間を用いており、この時間と安全防護物の反応時間との合計（総合システム停止性能という）を求める。すなわち、物理的に完全停止状態を定義することが困難であるため、人側の条件により導出する方法としている。ただし、人体に危害が及ぼさない状態の定義が明確でなければ、時間の測定ができない。特に、機器が人体に接触しながら動作している状況からの停止過程があり得るため、危害の程度の判断は非常に重要である。

3.2 機械機能の終止に基づく安全停止条件

合理的に想定される最悪条件として、機器の一部が人体皮膚表面に触れている状態（皮膚変位 0）から、保護停止して皮膚を圧迫して変位させる過程を考える。ただし、機器は十分低速で動作するという前提であり、保護停止過程で人から機器への圧迫はないとする。このとき、人側から見た危害が及ばない条

表2 機械的刺激に対する人体皮膚の許容変位量

人体部位	許容変位 (mm) (5パーセント イル値)	人体部位	許容変位 (mm) (5パーセント イル値)
額	2.1	背	13.7
胸	18.7	尻	53.0
腹	21.1	大腿	31.7
肩甲骨	16.6	膝	13.3
上腕	19.5	臍	3.2
前腕	13.6	脛ら脛	23.8
手甲	4.9		

件は、次の2つである。

- 1) 皮膚の変位は許容値以内
- 2) 許容変位を超える前に回避可能

1) の値は、表2に示す痛覚耐性に基づく人体部位毎の許容変位[5]が利用できる。2) については、人がロボット不意動作を検知して非常停止ボタンを操作するまでの時間を測定した報告があり、触覚による危険認知・回避時間は約 0.5s、視覚情報に基づく場合はそれよりも遅く 1s 前後とされた[6]。

以上より、人の危険認知・回避時間より短い時間内で機器の変位量が皮膚の許容変位を超えれば、回避失敗、すなわち危害が及ぶ恐れありと見なせる。例えば、許容変位量を x_a 、視覚に基づく危険認知・回避時間を t_d とすると、機器の停止過程の変位量が表2の最悪値として $t_d=1s$ 間以上、 $x_a=2.1mm$ 以内に収まっていれば、1s の計時開始時点が「危険な機械機能の終止」状態に達したと判断される。図1は、この時刻を停止時刻とし、以降変位量 x_a 、許容時間 t_d の「ウインドウ」内に変位が収まっていることが安全停止状態と定義している。

機器の保護停止状態の維持についても、この条件を適用でき、図1に示すように、電磁妨害発生時に可動部が微動したとしても、この「ウインドウ」内に収まっていれば人には危害が及ばず、収まらない場合は停止状態から逸脱したと判断する。人と接触を前提とするロボット介護機器のイミュニティ試験におけるFS判定基準は、 $t_d=1s$ 間以上、 $x_a=2.1mm$ 以内の「ウインドウ」を用いて判定できることになる。なお、 t_d の値の決定については、機器の動作特性や関与する人の属性等を考慮する場合がある。

4. イミュニティ試験における安全停止状態の監視

4.1 停止状態の監視方法

保護停止状態のロボット介護機器に対して、想定される電磁妨害が印加された場合でも、機器可動部の変位量が前章の判定「ウインドウ」内に収まって

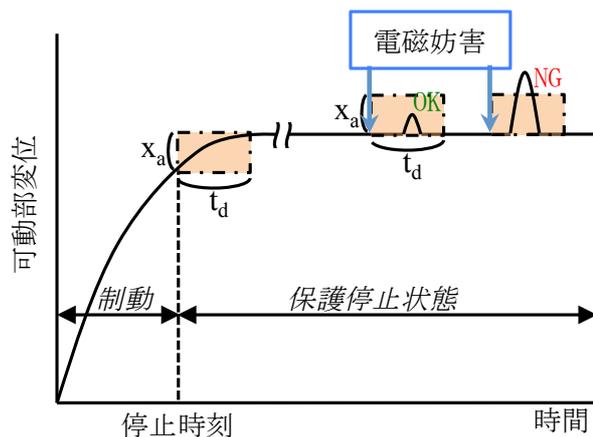


図1 安全停止条件に基づく安全判定方法

いることを監視する方法は多数想定される。ただし、機器可動部の動作監視は、微動を観測して 2.1mm を超えるか否かを判断しなければならないため、目視やカメラ等での判定は難しい。また、電磁ノイズ環境下では、機器近傍に導体や配線を配置すると電磁界が乱され正確なノイズ印加が行えない可能性があるため、接触式の位置センサや機器の内界センサの流用は避けることが望ましい。

このため、機器の微動動作の確認には 3次元リアルタイムモーション計測装置 ((株)ノビテック製) を用いた。これは、反射マーカーをマーカーから離れて配置された 3 台以上のカメラで確認し、その 3次元位置をソフトウェアで計測するものである。

4.2 停止状態の測定装置と試験手順

使用した装置は、H400×W500×D200 mm の計測空間において、約 0.05mm の位置精度の測定が可能である。また、複数のマーカーの同時測定に対応するため、死角の生じやすい回転を伴う動作や複数可動部の同時動作の有無の確認が可能である。この装置により得られるマーカーの 3次元軌跡が、電磁ノイズを印加した際に判定「ウインドウ」内にあることを確認する。

例えば、印加する電磁ノイズが放射 RF 電磁界の場合の測定装置の構成を図2に示す。同図では、試験対象例として多関節ロボットアームを配置している。この測定は、外界と電磁的に隔離された電波暗室内にアンテナを用いて、ノイズとして数 V/m レベルの高周波電磁波を印加するものである。ロボットアームの停止状態監視には、アーム各部位に貼付した反射マーカーの動作軌跡を 3次元リアルタイムモーション計測装置で計測する。反射マーカーの貼付場所は、動作した場合に人体と接触する可能性のある部位とする。このマーカーを読み取る、位置計測装置のカメラは、マーカーが確認できる電波暗室内部に設置する。カメラが取得するマーカーのデータは、

USB ケーブルと光ファイバーを介して、電波暗室外の PC に送られ、対象マーカの 3 次元位置を算出する。

なお、発生させる電磁妨害が計測装置（カメラ部）にも印加されるため、位置計測ソフトウェアが正常に動作しない、あるいは故障する可能性がある。これを防ぐために、USB ケーブルにフェライトコアの挿入、機器の暗室金属面への接地等の EMC 対策を行った。これにより、20V/m の強度の電磁界を印加した場合においても、マーカの位置計測が問題なく行えることが確かめられた。イミュニティ試験には、この他にも静電気放電（ESD）等が必要であるが、これらの電磁妨害印加においても位置測定が問題なく可能であることを確認している。

4.3 イミュニティ試験の例

この測定環境を用いた測定事例として、図 3 に示す多関節アームロボット（Universal Robot）の停止状態の安全を確認した。ロボットの状態は、アーム先端をある一定位置に保持した状態において、電磁妨害を印加しても、先端の位置変動が前出判定「ウインドウ」以内であることを確認する。位置確認のためのマーカは、アーム先端（A）と肘関節軸芯（B）の 2 か所に接着した。

アーム先端をある一定位置に保持した状態（停止カテゴリ-2 の保護停止状態、すなわちサーボ停止状態）において、3V/m 強度の 80%AM 変調信号を 80MHz ~ 1000MHz の周波数範囲に渡って 1% ステップで印加した。また、ESD ガンを用いてアーム先端に ±2kV, ±4kV, ±8kV の間接放電も行った。

以上の試験した全ての電磁妨害において、電磁妨害印加の有無によりマーカの位置の測定値は「ウインドウ」以内に入っており、位置変位量は全時間領域でも規定の 2.1mm 以下であることが確認できた。

5. おわりに

人と接触するロボット介護機器に対して、イミュニティ試験における停止性能の安全判定基準を、人の皮膚許容限界から定めた規範により提案した。その判定方法として、カメラを用いる 3 次元リアルタイムモーション計測装置を用いて、実際のロボットアームにより効果を確認した。

今後、より複雑な動作軌跡への適用を検討する予定である。

参 考 文 献

- [1] JIS C 61000-6-1 : Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 6-1: Generic standards - Immunity for residential, commercial and light-industrial environments, 2008.
- [2] IEC 61326-3-1 : Electrical equipment for measurement,

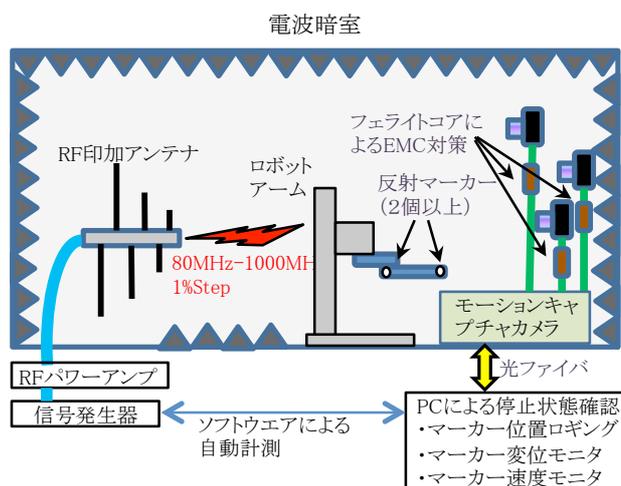


図 2 放射 RF 妨害印加時の保護停止状態の維持確認方法（ロボットアーム対象）

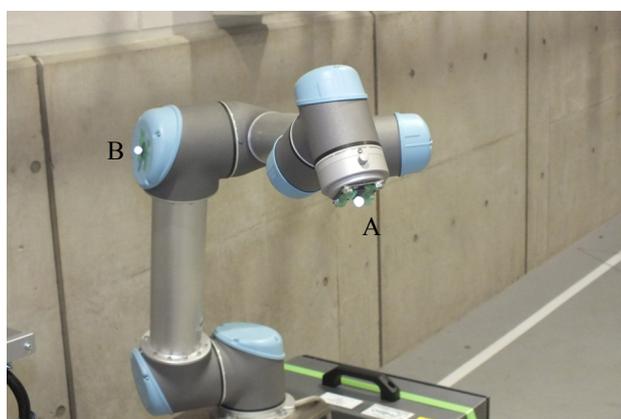


図 3 多関節ロボットへのマーカ装着状況（エンドエフェクタ，肘関節軸の 2 か所）

- control and laboratory use - EMC requirements - Part 3-1: Immunity requirements for safety-related systems and for equipment intended to perform safety-related functions (functional safety) - General industrial applications, 2008.
- [3] 村上真之, 池田博康: “機能安全を導入した生活支援ロボットのための放射 RF 電磁界イミュニティ試験システムの開発”, 信学技法 EMCJ2012-121, pp.111-116, 2013.
 - [4] ISO 13855 : Safety of machinery - Positioning of safe-guards with respect to the approach speeds of parts of the human body, 2010.
 - [5] 齋藤剛, 池田博康, 人間協調型ロボットの機械的的刺激に対する人体痛覚耐性限界の測定, 産業安全研究所特別研究報告, SRR-No.33-3, 2005.
 - [6] 深谷潔, 触覚による高齢者の危険認知能力の評価産業安全研究所特別研究報告, SRR-No.13-5, 1993.