

7. 産業用ロボットへの適用を目的とした 旋回角度監視装置の開発と評価*

梅崎重夫**, 小林茂信***, 濱田健次郎****, 藤原一志*****

7. The Development and Evaluation of the Turning Angle Monitor for the Purpose of the Application to Industrial Robots*

by Shigeo UMEZAKI**, Shigenobu KOBAYASHI***,
Kenjiro HAMADA**** and Kazushi FUJIWARA*****

Abstract: This report proposes a new turning angle monitor for the purpose of its application to industrial robots. The conventional robot systems sometimes use limit switches to detect the position of the robot. However, it was difficult to detect the accurate angle of the robot because the limit switch could not detect any angles. The new turning angle monitor which can generate the analog output voltage in proportion to the turning angle of the robot was developed for the purpose.

The new angle monitor used power reed switches installed in the round shape around the robot, and these switches were operated by the permanent or electronic magnet. Features of this equipment were described as follows:

- (1) The accurate turning angle of the robot could be simply confirmed, because the output voltage was generated in proportion to the turning angle of the robot.
- (2) The fault part could be clarified by measuring the output voltage, because the different output voltages were generated depending on the normal and abnormal conditions.
- (3) The fail-safe system was realized by the programmable logic controller with triple redundancy, diversity and self checking mechanism.
- (4) The electro-magnetic noise would not affect this system, since the noise energy is too low to drive power reed switches.
- (5) The excellent reliability and safety could be realized, because the failure rate of power reed switches was very low (for example, less than 0.7 fit).
- (6) As a tamper-proof countermeasure, the method applying the enclosure of the sensor was surpassed than the method of periodically demagnetizing the magnetic field.

As this study is under execution at present, the reliability test of power reed switches to switch over two hundred million times will be carried out, and the safe performance under the actual environment will be confirmed.

Keywords; Safety control, Safety device, Turning angle monitor, Fail-safe, Tamper proof, Power reed switch, Industrial robot

* 本研究の一部は、第31回安全工学シンポジウム（平成13年7月13日）で発表した。

** 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

*** 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Supporting Staff for Priority Research, Japan Science and Technology Corporation

**** 安川コントロール株式会社 Yasukawa Controls Co., Ltd.

***** 福岡工業大学 Fukuoka Institute of Technology

1. はじめに

最近の安全技術の国際化に伴い、ロボット制御の分野でも国際的な安全規格である ISO12100 や IEC61508 に規定された安全方策が必要とされている。このような方策を実施する場合、磁気を使ったパワーリードスイッチは、安価で信頼性が高く（補足1参照）、故障時にフェールセーフな特性を実現でき、かつ電磁ノイズ環境等の影響を受けにくいことから、安全性の高い装置を実現する上で必須の構成要素と考えられる。

一方で、パワーリードスイッチは作業者が永久磁石などを使って接点を意図的に無効化できるという問題があった。そこで、本研究ではパワーリードスイッチを利用した産業用ロボットの旋回角度監視装置を対象に、作業者が装置を意図的に無効化できないタンパープルーフ構造を検討した。なお、本装置は現在開発中であるため、既に完了した部分のみについて報告する。

2. タンパープルーフ構造

タンパープルーフとは、作業者が生産効率を上げようとして安全装置や安全制御回路などを意図的に無効化するのを防止する技術と考えられる。これを構造として具体的に実現したのが、タンパープルーフ構造である。

Table 1 に、安全装置や安全制御回路を対象としたタンパープルーフ構造の一覧表を示す。ここでは、作業者が行う意図的無効化の形態を、情報またはエネルギー（タイプA）、空間（タイプB）、時間（タイプC）に対する意図的無効化としてまとめた。また、これらの行為に対する安全方策として、エンクロージャを中心とした対策（たとえば、磁気シールドなど）をフェーズ1、安全制御を中心とした対策（たとえば、定期的自動監視など）をフェーズ2としている。

3. タンパープルーフ構造を備えたロボット用絶対角度検出装置

3.1 本装置を考案した背景

従来、ロボットシステムでは、ロボットが特定の旋回角度に到達したことを検出するために、リミットスイッチなどを使用してきた。しかし、この方式は、特定の旋回角度で初めてスイッチをオンまたはオフするため、ロボットの正確な角度を検出するのは極めて困難であった。

このため、従来より、ロボットに設けられたエンコーダを使って原点位置からの相対角度を検出し、この情報に基づいて絶対角度を算出する方法が採用されてい

る。しかし、エンコーダはフェールセーフな構造とするのが不可能なために、位置ずれを起こした場合は、ロボットが暴走し、予想もつかない動作を行うという問題もあった。

筆者らは、これらの問題点を解決するために、当初、一定の抵抗値を持つ円盤の上に摺動子を滑らせて、ロボットの旋回角度に対応したアナログ信号を出力するという方式を検討した。しかし、この方法で実験を行うと、円盤や摺動子が摩耗してしまい、長期的な使用に耐えないという問題が発生した。

そこで、摺動部分をなくした非接触方式とするために、ロボットの旋回と共に移動する磁石によってロボットの周囲に円形状に設けたパワーリードスイッチを順次一個づつオンとしていき、これによってロボットの旋回角度に応じたアナログ信号を発生できる方式を考案した。

3.2 装置の構造

Fig. 1 と Photo 1 に、本研究で考案した角度検出装置の構造を示す。この装置は、ロボットの旋回角度に沿って配置された全部で72個（ $=360 \text{度} \div 5 \text{度}$ ）のパワーリードスイッチと、ロボットの旋回と共に移動してパワーリードスイッチの接点を順次一個づつオンさせる駆動用の永久磁石と、ロボットの絶対角度に応じたアナログ信号を発生する絶対角度検出回路から構成される。

Fig. 2(a) は、旋回角度監視回路の概念図である。この回路では、ロボットが360度旋回するときの旋回角度を5度単位で監視するために、72個のパワーリードスイッチ S_1, S_2, \dots, S_{72} と同じく72個の電気抵抗 R_1, R_2, \dots, R_{72} を図のように配置している。また、 R_S は信号出力を発生させるための電気抵抗であり、この存在によって測定誤差が生じないように $R_S \gg \sum_{N=1}^{72} R_N$ としている。さらに、この回路では、旋回角度に一次比例した電圧を抵抗 R_S の両端に発生させるために、抵抗値を $R_1 = R_2 = \dots = R_{72}$ とした。

ここで、駆動用永久磁石の移動によって x 番目のパワーリードスイッチ S_x がオンした場合、抵抗 R_S の両端には次の出力電圧が発生する。

$$V_S = E - \sum_{N=1}^x R_N \cdot E / R_0 \quad (1)$$

ただし、 V_S は抵抗 R_S の両端電圧、 E は電源電圧であり、 $R_0 = \sum_{N=1}^{72} R_N$ である。

Table 1 The list of tamper proof structures.
タンパープルーフ構造の一覧表

区分	リスク要因	意図的無効化の具体例	フェーズ1 (エンクロージャ)	フェーズ2 (安全制御)	
タイプA (情報またはエネルギーに対する意図的的行為)	A 1	Short	・安全装置, 安全スイッチ, 非常停止ボタン等の接点または端子間の短絡	・特殊工具でなければエンクロージャが開かない	・オフ確認 (接点または端子間の印加電圧を一時的にオフとし, これによって運転許可信号が停止するか確認する)
	A 2	Open	・警報装置の信号線の切断による警報の停止	・同上	・警報装置の正常確認 (警報を定期的に作動させ, 確かに警報が鳴るかを確認する)
	A 3	Charge	・磁石による安全スイッチの意図的無効化	・磁気シールド ・特殊工具でなければエンクロージャが開かない	・安全スイッチのオン/オフする順序が正常か確認する。 ・安全スイッチを動作させる磁石を電磁石とし, 電磁石に印加する電圧を定期的にオフとし, これによって安全スイッチがオフとなるか確認する。
			・安全装置の出力を電源等で代替	・特殊工具でなければエンクロージャが開かない	・安全装置が発生する電圧を定期的にオフとする。 ・安全装置出力を交流とする。
	A 4	Dis-charge	・電源プラグを抜いて, 警報装置を無効化 ・意図的な電圧の降下	・電源との直結 ・エンクロージャ	・電圧の正常確認
A 5	Rewrite	・プログラムやデータの意図的な書き換え	パスワード, ソフトウェアの暗号化	—————	
タイプB (空間的関係の意図的無効化)	B 1	Lock	・安全スイッチの接点等の意図的な固定	・エンクロージャ	・安全スイッチの接点動作の正常性確認
			・両手操作式安全装置の片方の意図的な固定	—————	・オフ確認 ・同時性判定
	B 2	Unlock	・ガード, 安全装置, 安全スイッチ等の意図的な取り外し	・機械的強度の向上 ・特殊ネジの使用	—————
	B 3	Move	・ガード, 安全装置, 安全スイッチ等の意図的な移動 ・安全距離の短縮	・機械的強度の向上 ・特殊ネジの使用	—————
	B 4	Break	・ガード, キー, ロック装置等の破壊	・機械的強度の向上	—————
B 5	Over	・ガードや安全装置の乗り越え, 飛び越え, 下方からの進入	・補助ガード	—————	
タイプC (時間的関係の意図的無効化)	C 1	Delay	・時刻の意図的な遅延	・エンクロージャ	—————
	C 2	Early	・時刻を意図的に早める	・エンクロージャ	—————
	C 3	Shorten	・時間を意図的に短くする	・エンクロージャ	—————
	C 4	Lengthen	・時間を意図的に長くする	・エンクロージャ	—————

注1) 安全関連要素には, ガード, 安全装置, 安全スイッチ, 電磁リレー, 電磁弁等が含まれる。

注2) 「タイプ」, 「フェーズ」等は暫定的に使用する用語であり, 一般的なものではない。

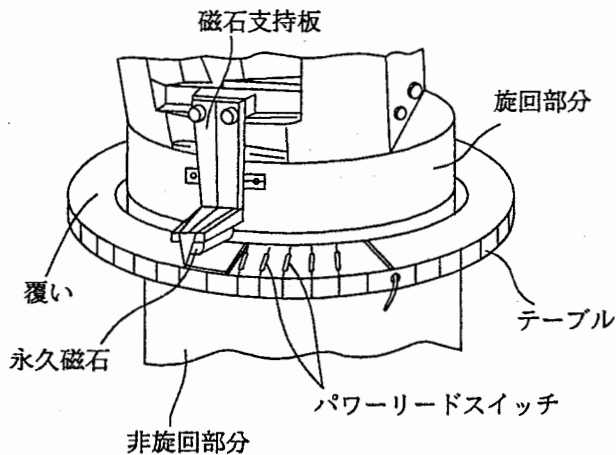


Fig. 1 The structure of the turning angle monitor.
旋回角度監視装置の構造

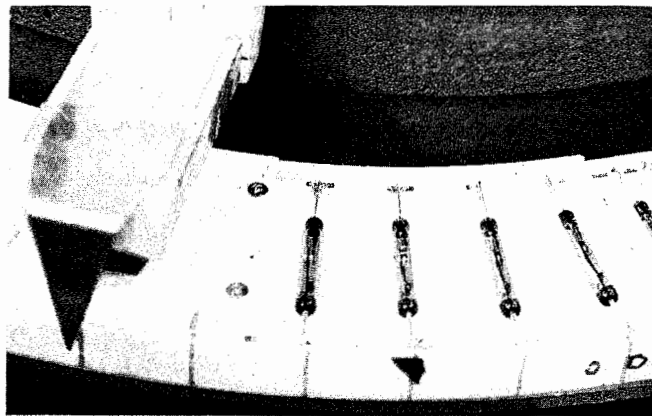
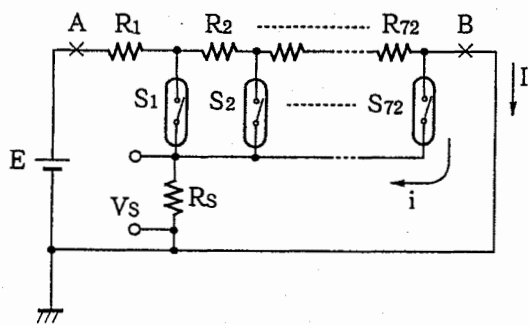
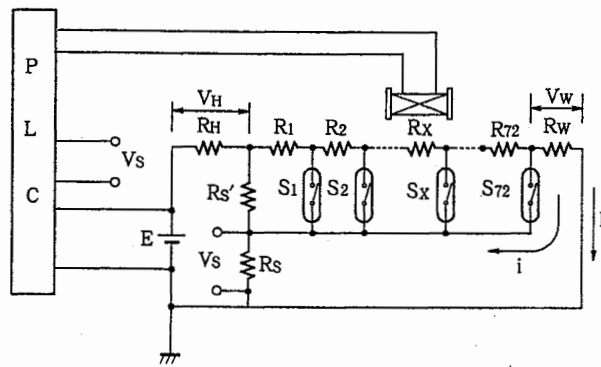


Photo 1 The appearance of the turning angle monitor.
旋回角度監視装置の外観



(a)



(b)

Fig. 2 The basic configuration figure of the turning angle monitoring circuit.
旋回角度監視回路の基本構成図

Fig. 2(a) の回路では、以下の故障が発生した場合、次のような問題が発生すると考えられる。

- ① 「A」の箇所で断線が発生すると、 $V_S = 0$ となる。一方、スイッチ S_{72} の作動時も $V_S = 0$ となり、両者を区別できない。
- ② 「B」の箇所で断線が発生すると、 $V_S = E$ となる。一方、スイッチ S_1 の作動時も近似的に $V_S = E$ となり、両者を明確に区別できない。
- ③ この回路では、リードスイッチ B_x に接触不良が発生すると、 $V_S = 0$ となる。一方、「A」の箇所で断線が発生したときも、 $V_S = 0$ となり両者を区別できない。

Fig. 2(b) は、以上の点を考慮した旋回角度監視回路である。この回路では、抵抗 R_W の設置によって、リードスイッチ S_{72} の作動時には電位 0 との間に Fig. 2 の V_W なる電位差を生じさせ、①の問題に対処している。また、抵抗 R_H の設置によって、リードスイッチ S_1 の作動時には電位 E との間に Fig. 2 の V_H なる電位差を生じさせ、②の問題に対処している。さらに、

リードスイッチと並列に抵抗 $R_{S'}$ を設け、これによりリードスイッチの接触不良時には電位 0 との間に $V_S = R_{S'} \cdot E / (R_S + R_{S'})$ なる電位差を生じさせ、③の問題に対処している。

以上より、信号出力 V_S は次式となる。

(a) 正常時

$$V_S = E - (R_H + \sum_{N=1}^X R_N) \cdot E / R_A \quad (2)$$

$$\text{ただし、} R_A = R_H + R_W + \sum_{N=1}^{72} R_N$$

(b) リードスイッチの接触不良、磁石の脱落時

$$V_S = R_S \cdot E / (R_S + R_{S'}) \quad (3)$$

(c) 抵抗 R_n (周辺配線を含む) の断線時

$$x < n \text{ のとき } V_S = E \quad (4-a)$$

$$x \geq n \text{ のとき } V_S = 0 \quad (4-b)$$

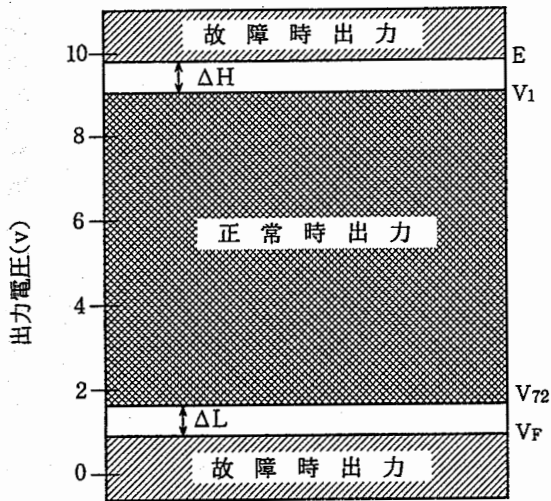


Fig. 3 The conceptual scheme of signal output of the turning angle monitoring circuit.
旋回角度監視回路の信号出力の概念図

(d) 抵抗 R_H (周辺配線を含む) の断線時

$$V_S = 0 \quad (5)$$

(e) 抵抗 R_W (周辺配線を含む) の断線時

$$V_S = E \quad (6)$$

Fig. 3は、Fig. 2(b)の回路を使用したときの信号出力 V_S の概念図である。ここで、正常時出力と故障時出力が明確に区別されるためには、Fig. 3の ΔH と ΔL に対して次の条件が必要である。

$$\Delta H = (E - V_1) > \varepsilon \quad (7)$$

$$\Delta L = (V_{72} - V_F) > \varepsilon \quad (8)$$

ただし、 V_1 は(2)式で $x = 1$ 、 V_{72} は(2)式で $x = 72$ のときの V_S の値である。また、 ε はセンサー出力の識別を可能とする最小値である。

3.3 タンパープルーフ構造

Fig. 1の装置では、作業者が永久磁石を使って特定のパワーリードスイッチを意図的にオンすると、装置が無効化されて安全上問題である。そこで、永久磁石の代わりに電磁石を使用し、特定のタイミング(たとえば、スタートボタンの操作時や10秒間に一回など定期的に)で電磁石での通電を切り、このとき V_S の出力が(2)式の値となることを持って装置の正常性を確認する。

Fig. 4は、この装置のタイミングチャートである。この装置では、次の一連の順序によって作業者が永久磁石を使用して意図的な無効化を行っていないことを確認する。

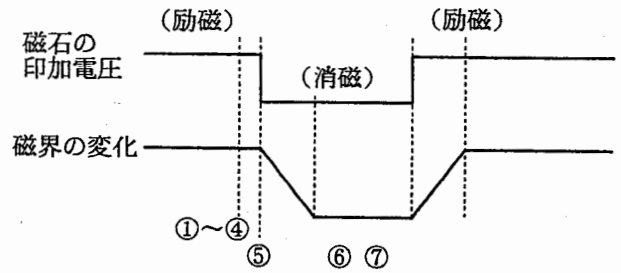


Fig. 4 Timing chart for the tamper proof.
タンパープルーフのためのタイミングチャート

- ① 旋回角度監視回路に印加されている電源電圧が正常であることを確認する。
- ② プログラマブル・コントローラ (PLC) からの出力信号で電磁石を励磁する。
- ③ ②の磁界によっていずれかのパワーリードスイッチがオンとなる。
- ④ 抵抗 R_S の両端に発生した電圧を計測する。もし、電圧が(2)式に従っているなら、パワーリードスイッチが正常に駆動されていることが確認できる。
- ⑤ PLCからの出力信号をゼロとして電磁石を消磁する。
- ⑥ もし、作業者が永久磁石を使用して意図的な無効化を行っていないければ、すべてのパワーリードスイッチはオフとなる。
- ⑦ 抵抗 R_S の両端に発生した電圧を計測する。もし、電圧が(3)式に従っているなら、作業者が永久磁石を使用して意図的な無効化を行っていないことが確認できる。

なお、本装置では、異種冗長化されたフェールセーフな PLC を使用し、PLC 自身の故障にも対応できるようにしている。この詳細は、第2編を参照されたい。

4. 実験装置、結果及び考察

4.1 実験装置

実験に使用した産業用ロボットは、安川電機製の K10 である。パワーリードスイッチには、安川コントロール製の R15 を使用した。また、電気抵抗には炭素皮膜抵抗を用いているが、これは焼損時に必ず抵抗値を低下側とするためである。

フェールセーフな安全コントローラには、ドイツ・ピルツ社製の PSS3100 を使用し、これにより安全リレーを介することなくコンタクトを直接駆動している。これにより、(2)式に示した電圧の正常確認と印加電圧 (10V) の正常確認をフェールセーフに行うことを可能としている。

4.2 実験結果と考察

Fig. 5 は、装置が正常なときと故障したとき (①パワーリードスイッチの接触不良, ②磁石の脱落, ③抵抗の断線, ④配線の断線) の信号出力の実測結果である。図からも明らかなように、正常時と故障時の出力電圧は明確に区別される。また、パワーリードスイッチの接触不良時は信号出力 V_S は $R_S E / (R_S + R_S') V$, 抵抗器の断線時は 0 または EV となるから、この両者の識別も可能である。

したがって、運転許可のウィンドウをたとえば 0.17E から 0.91E 程度に設定すれば、装置が正常なときだけ運転許可し、装置の故障時には運転停止とすることができる。また、⑤電源電圧の上昇や低下が起きたときは、汎用安全コントローラの正常確認機能 (本装置では電源電圧が 9.8V から 10.2V のときに限って運転許可) によって、ロボットの運転を停止できる。

これに対し、⑥パワーリードスイッチの溶着や⑦作業者が永久磁石を使ってパワーリードスイッチを意図的に無効化したときは、信号出力は (2) 式の範囲内となることがあり、安全上問題である。このため、筆者らは、⑦に対する対策として、エンクロージャー (フェーズ 1) 構造の実現を試みた。

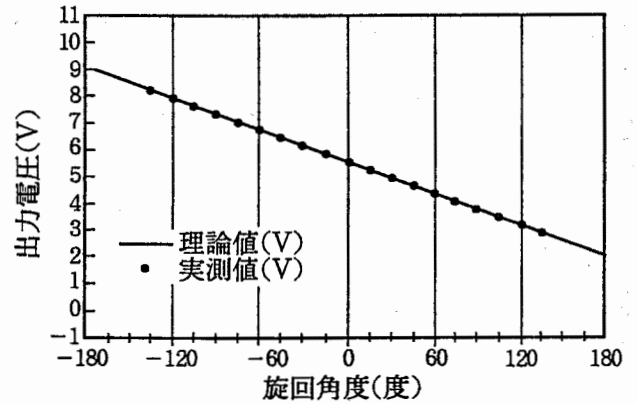
これは、絶対角度検出装置の周囲を所定の厚みを持つ遮蔽構造及び/または磁気シールド用の金属板で覆うことによって、作業による装置の意図的な無効化を不可能とするものである。しかし、この構造は、エンクロージャー構造が巨大となり、金属板の使用のために重量が増大するという問題がある。また、作業者がエンクロージャーを意図的に取り外したときや、上記⑥に対する対策として有効でない。そこで、本研究では、これらの問題を総合的に解決するために、電磁石を用いたタンパーブーフ構造を考案した。

5. システムの総合評価と今後の課題

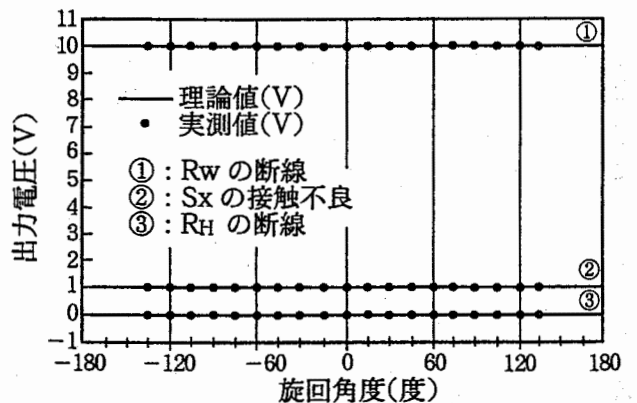
本研究では、装置の開発と平行して、安全技術の専門家による評価を行った。この評価では、社団法人日本電気制御機器工業会 (NECA) が実施中の「制御システムを構成する制御機器の安全技術に関する標準化」に参画している専門家、見学や打ち合わせのために当所を来訪した専門家、及び当所の研究員の協力を得た。

このうち、NECA に参画している専門家による評価では、角度監視用のセンサーとしてパワーリードスイッチを使用することの是非が議論となった。この主たる反対論は、「わざわざ磁気を使わなくても光電センサーを使えば良いのではないか」、「パワーリードスイッチを封入するガラス管が破損した場合、封入されている

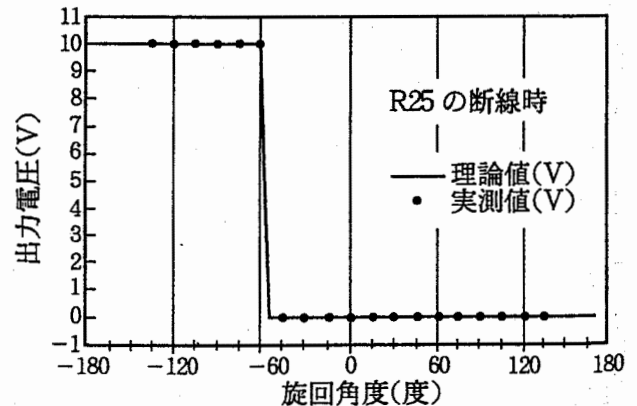
窒素ガスが放出されるため、接点性能が低下するのではないか」というものである。しかし、「フェールセーフ性や耐ノイズ性を考慮した場合、光よりも磁気の方が格段に優れている」、「安全を守る最後の切り札として、このような装置は絶対に必要である」との意見もあり、最終的には当初案に従ってパワーリードスイッチを採用した。なお、ガラス管の破損に対しては、パワーリードスイッチを円筒形のアルミなどで覆うことで対応可能である。



(a) 正常値



(b) リードスイッチ Sx の接触不良、抵抗 R_H または R_w の断線



(c) 抵抗 R_x の断線

Fig. 5 Experimental result. 実験結果

次に、現場の安全管理の専門家からは、①旋回角度に比例した出力電圧が出てくるため、現在の旋回角度を容易に把握しやすいこと、②正常時と故障時で出力電圧が異なり、かつ故障時は出力電圧の大きさを故障発生箇所を特定できること、③装置が安価であることなどについて、高い評価を得た。

一方、所内の研究員からは、「本装置ではタンパーブールフ構造とするためにパワーリードスイッチを電磁石で駆動しているが、構造と制御を簡素化するためには永久磁石を使用の方が良いのではないか」との指摘があった。また、同様の指摘を、現場管理者からも受けた。そこで、本装置では、ポリアセタール樹脂を使った遮蔽板でパワーリードスイッチを覆うエンクロージャー構造とすることで、パワーリードスイッチを永久磁石で駆動できるようにした。

さらに、所内の研究者による評価では、「多数のパワーリードスイッチを使用すると、信頼性が低下するのではないか」との指摘もあった。このため、今後は、①第2編で提案した理論に基づく装置の定量的な安全性評価、②装置のFMEA解析とフィールドデータ（特に、既にパワーリードスイッチを使用している鉄道システムでのデータ）の突き合わせによる非対称誤り率（発生するすべての故障に対する危険側となる故障の比）の推定、③スイッチ接点のオン/オフ回数2億回超えを目標とした信頼性試験などを行い、実環境下での装置の真の安全性を確認する予定である。

6. おわりに

従来のロボットシステムでは、ロボットが特定の旋回角度に到達したことを検出するために、リミットスイッチなどを使用してきた。しかし、この方式は、特定の旋回角度で初めてスイッチをオンまたはオフするため、ロボットの正確な角度を検出するのは極めて困難であった。

そこで、本研究では、ロボットの旋回と共に移動する磁石によってロボットの周囲に円形状に設けたパワーリードスイッチを順次一個づつオンとしていき、これ

によってロボットの旋回角度に応じたアナログ信号を発生できる方式を考案した。この装置の特徴は次の通りである。

- 1) 旋回角度の監視に磁気を使ったパワーリードスイッチを使っているため、故障時にフェールセーフな特性を実現でき、かつ電磁ノイズ環境等の影響を受けにくい。
- 2) パワーリードスイッチの故障率が0.7 fit以下と極めて小さいため、安全性と信頼性の両方に優れた装置を構成できる。
- 3) 旋回角度に比例した出力電圧が出てくるため、現在の旋回角度を容易に把握しやすい。
- 4) 正常時と故障時で出力電圧が異なり、かつ故障時は出力電圧の大きさを故障発生箇所を特定できる。
- 5) 装置が安価である。

今後は、実用的な装置を完成させるとともに、第2編で提案した理論に基づく装置の定量的な安全性評価、装置のFMEA解析とフィールドデータ（特に危険側故障）の突き合わせによる非対称誤り率の推定、スイッチ接点のオン/オフ回数2億回超えを目標とした信頼性試験などを行い、実環境下での装置の真の安全性を確認する予定である。

参考文献

- 1) 小林茂信・梅崎重夫、磁気駆動スイッチを用いたロボット移動角度検出装置、日本機械学会第9回交通物流部門大会(2000), pp.167-168.

[補足1]

パワーリードスイッチを製造している安川コントロール株式会社によれば、スイッチの接点のオン/オフに異常を生じる確率は0.7 fit (0.7×10^{-9} 回/h)以下とされている。

(平成14年1月10日受理)