

# フェールセーフ機能付ロータリーエンコーダの開発

梁 ミン

## A Rotary Encoder with Fail-Safe Functions

M. LIANG

An Air Linear Mover (ALM) is currently under development to serve as a new automatic passenger transportation system. Supported by an air suspension system and driven by linear motors, ALM makes a feature of flexibility to steep slopes and curves, with minimum noise and vibration generated. Kinds of evaluation are on the way to ensure that ALM will perform satisfactorily in actual operation.

This paper reports a new kind of rotary encoder with fail-safe functions, which is designed as a speed detector for ALM. Principles and methods to realize the fail-safe functions are discussed in detail. Experimental results show that the fail-safe functions work well on detecting electrical abnormality of an encoder.

- |                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| 1. はじめに         | 3. 異常検出         |
| 2. フェールセーフエンコーダ | 3.1 断線の検出       |
| 2.1 動作原理        | 3.2 発光部光量不足の検出  |
| 2.2 開口部         | 3.3 受光部の異常検出    |
| 2.3 回路処理        | 3.4 信号処理回路の異常検出 |
| 2.4 省線化         | 3.5 異常検出回路の異常検出 |
| 2.5 仕様          | 4. おわりに         |

### 1. はじめに<sup>1,2)</sup>

十数年来、リニアモータを利用した都市交通システムの研究・開発が急速に進んでいる。大阪と東京でリニアモータ地下鉄、広島でロープ駆動式簡易懸垂形モノレールシステム(スカイレール)などがすでに実用化されている。特に、空気浮上による支持方式(Hovair)プラスLIM(Linear Induction Motor)駆動のオチス'シャトルシステム(Otis Hovair Transit System)は、1980年より米国のデューク大学病院の構内交通手段として採用されてから、成田を含め、すでに世界各地の空港、リゾート地で運行している。

しかし、無公害、複雑な線路などに柔軟に対応できるため、新しいシステムの開発が望まれていた。そこで、低騒音、低振動、急曲線・勾配に対応するなどの特徴を持っている空気浮上・リニアモータ駆動の自走式新交通システムALM(Air Linear Mover)が浮かび上がってきた。現在、ALMは専用の試験ラインにおいて、実用化に向けて各種の評価試験、検討が進められている。

従来の鉄道車輛は、車軸にタコジェネレータ(速度発電機)を取付け速度制御をするのが主流であった。しかし、より高精度のコントロールが求められ、この新交通システムALMの速度制御は、従来の鉄道車輛の速度制御方式と違って、光学式のロータリーエンコーダを使用している。最低0.1km/hまでの速度検出ができ、高精度の速度・位置制御を可能としている。しかし、従来の光学式エンコーダは、エンコーダのシャフト、あるいは車輛が停止している場合には、信号線またはエンコーダ自体に何かの異常があっても、エンコーダの出力状態が変化しない。このため、電源・信号線の断線またはエンコーダ自体の異常により出力状態が変化しないのか、それともエンコーダシャフトが停止しているために出力状態が変化しないのか判断ができなかった。そこで、零速度付近も含め全動作領域での安全性を向上させ、断線・異常検出を可能としたフェールセーフ機能付きのエンコーダの開発が望まれた。

本報では、このようなフェールセーフエンコー

ダの開発について、異常検出原理や方法を提案しながら、実験によりエンコーダの異常検出機能を検証する。

## 2. フェールセーフエンコーダ

従来の光学式ロータリーエンコーダは、図1に示すように、発光ダイオード(以下LEDと称す)、受光フォトダイオード(以下PDと称す)、回転スリット板、固定スリット板、信号増幅・波形整形回路等で構成されるのが一般的である。LEDからの光が固定スリット板と回転スリット板を介し、PDに当たる。PDの光電変換で発生した電気信号が増幅・整形され、エンコーダの出力になる。

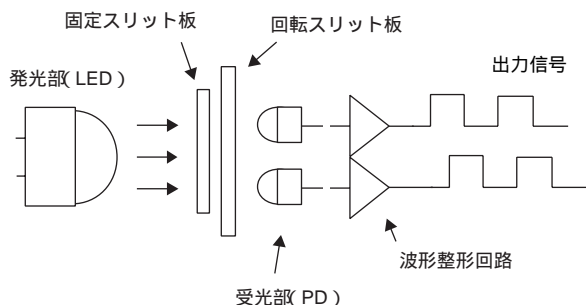


図1 光学式ロータリーエンコーダの構成  
Block-diagram of optical rotary encoder

しかし、エンコーダを長く使うと、LEDからの光量が徐々に低下し、エンコーダ出力波形のデューティ比、位相差などがずれてしまう可能性がある。また、エンコーダのシャフトが停止している場合、エンコーダの出力がHighかLowしか出ないので、エンコーダに異常があるかどうか判断できない。

今回開発したフェールセーフエンコーダは、鉄道車両、交通機関など安全性が重視されるものを対象とし、エンコーダケーブルの断線、LEDの光量低下、受光PDの異常、内部回路の異常などを検出できるものである。

### 2.1 動作原理

フェールセーフエンコーダの構成を図2に示す。基本動作原理は、パルスでLEDを駆動させ、エンコーダシャフトの回転によって、スリットを通過した光信号はパルスに変調される。信号処理回路により、エンコーダ出力信号とフェールセーフ診断パルスに分離される。診断パルスの周波数の検出によりエンコーダの出力信号が有効であることを判断できる。さらに、2重化回路により、信号処理回路・異常診断回路自身の異常等の検出も可能としている。

これらのフェールセーフ機能を実現するために、固定スリット板の開口部を広げ、変調された光信号を診断パルスとエンコーダ出力信号に分離する回路処理等が必要である。また、出力回路に異常があったかを監視するために、診断パルスとエンコーダ出力信号を合成によって1つの信号として出力する必要がある。

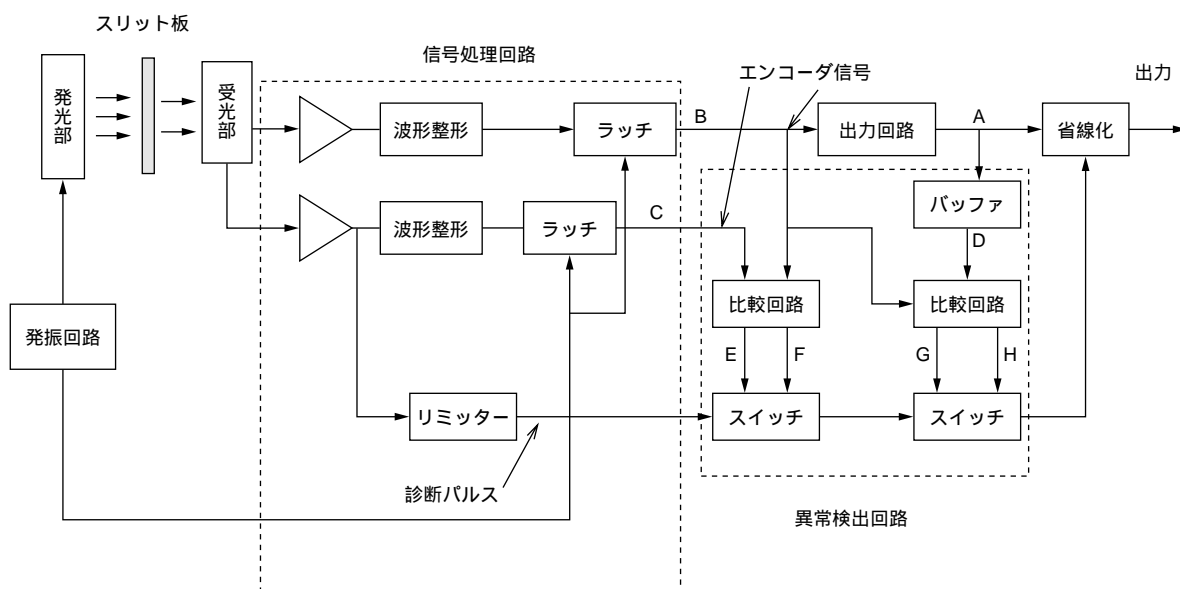


図2 フェールセーフエンコーダの構成  
Block-diagram of the fail-safe encoder

## 2.2 開口部

一般の光学式ロータリーエンコーダの固定・回転スリットパターンは、図3に示すように開口部(透光)が50%、閉口(遮光)部が50%の割合になっている。回転スリット板の回転に伴って、回転スリットと固定スリットの重なったパターンが完全明および完全暗を繰り返し、PDの出力は光の漏れがほとんどないため完全明と完全暗との間で変化する擬似正弦波となる。

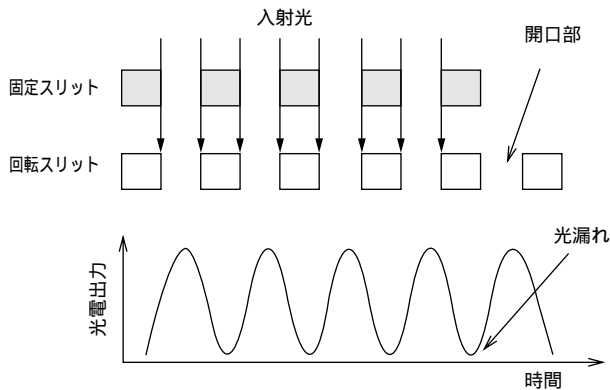


図3 一般的なエンコーダのスリットパターン  
Typical slit pattern of optical rotary encoder

これに対して、フェールセーフエンコーダは、回転スリットパターンの開口・閉口部はどれも50%の割合であるが、固定スリットパターンが図4に示すように開口部約80%、閉口部約20%の割合となっている。このため、スリット板は、完全に遮光することができなくなり、遮光時にも約30%の光が漏れている。

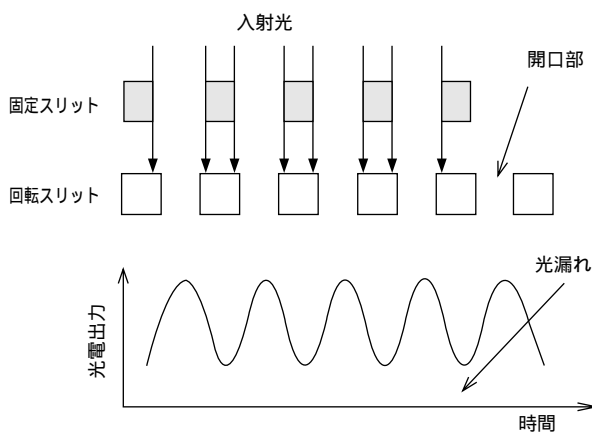


図4 フェールセーフエンコーダのスリットパターン  
Slit pattern of the fail-safe encoder

## 2.3 回路処理

固定スリット板開口部の設計により、光漏れが常に発生していることを利用し、発振回路で発生したパルスでスリットを透過した光信号を変調さ

せる。その結果、波形整形回路の入力波形は図5に示すようになる。基準レベル $L_1$ と $L_2$ を制御することで、診断パルスとエンコーダの矩形出力波が分離される。

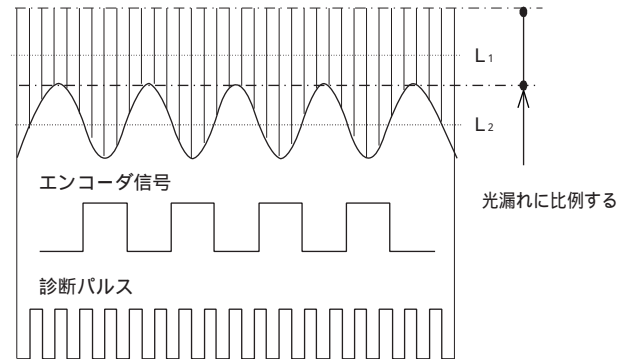


図5 エンコーダ信号と診断パルスの割り出し  
Separation of encoder signal and fail-safe signal

このエンコーダ信号(矩形出力波)が信頼できるかどうかを判断するために、比較回路、スイッチ回路などの機能を持つ異常検出回路は、信号処理回路の異常を常に監視している。異常が発生した場合、検出回路のスイッチング動作が働き、フェールセーフ診断パルスが遮断されることによって、異常が検出される。

さらに、2重化構成になっているので、異常検出回路自身になんらかの異常が発生しても、その異常を検出することができる。

## 2.4 省線化

信号処理回路からエンコーダ出力端子までの間に出力回路を設置している。エンコーダ信号と診断パルスがそれぞれ独立出力する場合、出力回路に異常が発生したか不明となる。信頼性を高めるため、フェールセーフ診断パルスとエンコーダ信号を図6のように合成により1つの信号として出力する必要がある。

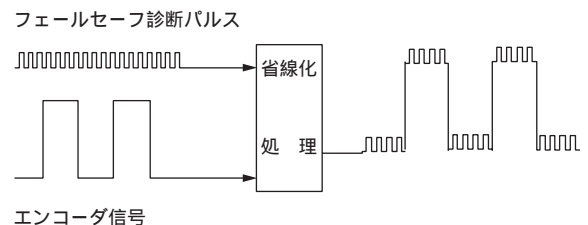


図6 フェールセーフエンコーダ出力の省線化  
Combination of encoder signal and fail-safe signal

2.5 仕様

フェールセーフエンコーダの主な仕様を表1に示す。異常が発生しない場合、周波数100kHzのフェールセーフ診断パルスは1V～5Vの大きさに出力する。異常が発生した場合、フェールセーフ診断パルスが異常となったり遮断されたりする。なお、電氣的に最高許容回転数が2000min<sup>-1</sup>、分解能が1回転360パルスであるため、このフェールセーフエンコーダの最高応答周波数は12kHzとなる。

表1 フェールセーフエンコーダの主な仕様  
Main specifications of the fail-safe encoder

1. 形式	パルス数	360ppr	
	スリット板	メタルスリット	
2. 電気特性			
電源	電源電圧	DC24V ±4V	
	許容リップル	3%rms以下	
	消費電流	70mA以下	
信号波形		1相出力	
電氣的最高許容回転数		2000min <sup>-1</sup>	
最高応答周波数		12kHz	
デューティ比		50±25%	
出力	立ち上り/立ち下り時間		3μs以下
	出力形式		トータムポール出力
	出力電圧	“H”	電源電圧 - 4V以上
		“L”	2V以下
	出力電流	流出“H”	最大30mA
		流入“L”	最大30mA
	フェールセーフ信号 (診断パルス)	周波数	100kHz±10%
		出力電圧, V	1 V 5
信号		正常時出力 異常時出力停止	
負荷電圧		DC35V以下	
3. 機械特性			
起動トルク		0.1N・m 以下	
軸慣性モーメント		1×10 <sup>-4</sup> kg・m <sup>2</sup>	
軸許容荷重	ラジアル	100N	
	スラスト	50N	
機械的許容最高回転数		5000min <sup>-1</sup>	
ケーブル	材質	耐油性PVC	
	公称断面積	0.3mm <sup>2</sup>	
	仕上がり外径	6.0mm	
4. 重量		約600g	
5. 環境条件			
使用周囲温度		-10 ~ +70	
保存周囲温度		-25 ~ +85	

3. 異常検出

3.1 断線の検出

一般的な光学式ロータリーエンコーダは、エンコーダシャフトが停止しているとき、出力は固定スリット板と回転スリット板の相対位置によってHighまたはLowとなる。

図7, 8に示すように、フェールセーフエンコーダは、フェールセーフ診断パルスがエンコーダの最終出力に重畳されている。GND線が断線した場合、エンコーダの出力は図9、電源線が断線した場合、エンコーダの出力は図10に示すように、フェールセーフ診断パルスが消えることによって、断線が検出される。

シャフトが停止している時に、エンコーダの断線を検出することができるので、フェールセーフエンコーダは零速度付近も含め全動作領域での安全性を向上させたものとなる。

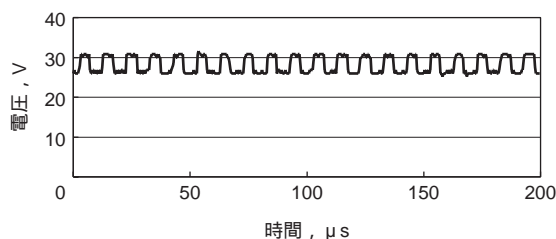


図7 シャフト停止時エンコーダの出力(ケース1)  
Encoder output with encoder shaft not rotating (case 1)

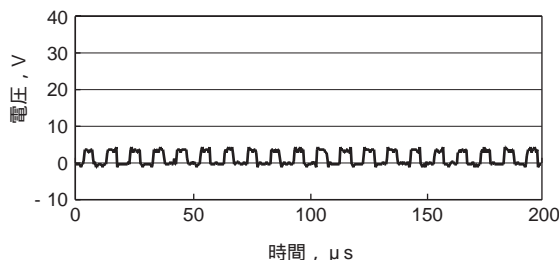


図8 シャフト停止時エンコーダの出力(ケース2)  
Encoder output with encoder shaft not rotating (case 2)

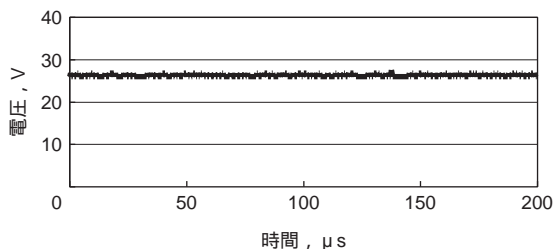


図9 GNDライン断線時エンコーダの出力  
Encoder output with GND line opened



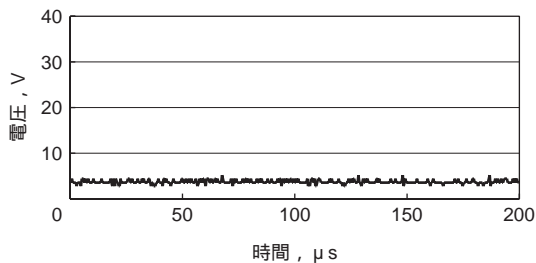


図10 電源ライン断線時エンコーダの出力  
Encoder output with power supply line opened

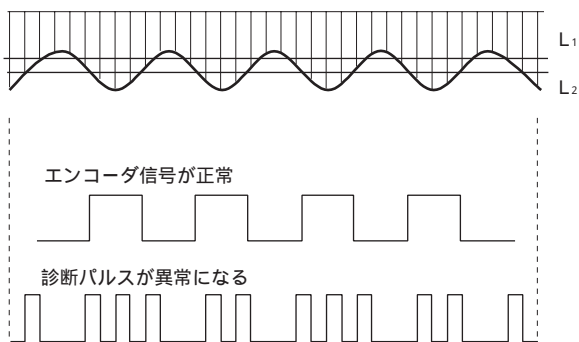


図11 LED光量低下の検出原理(1)  
Principle to detect light power reduction of LED (1)

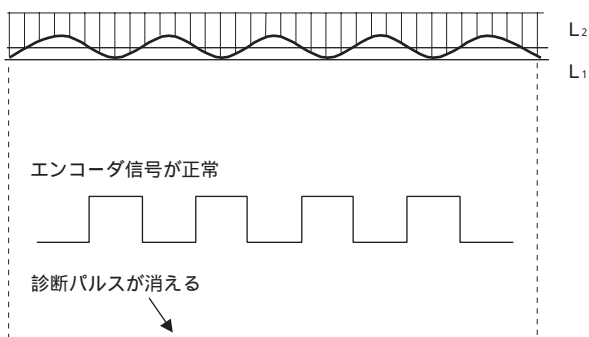


図12 LED光量低下の検出原理(2)  
Principle to detect light power reduction of LED (2)

### 3.2 発光部光量不足の検出

LEDの光量が低下すると、PDの受光量が比例的に低下するので、PDの出力も比例的に低下する。

LED光量不足の検出原理は図5、図11、12に示す。光量が正常な場合、図5に示すように、基準レベル $L_1$ と $L_2$ は離れていて、 $L_1$ が $L_2$ より高い。光量の低下に伴い、基準レベルも比例的に低下し、レベル $L_2$ が $L_1$ に近づく。ある段階(図11)になったら、診断パルス用波形整形回路の出力がHighになったりLowになったりするもので、フェールセーフ診断パルスは欠落が始め、異常となる。光量がさらに低下すると(図12)、レベル $L_1$ と $L_2$ との電圧高さが逆になり、診断パ

ルス用波形整形回路の出力が完全にLowになるので、フェールセーフ診断パルスが出なくなる。したがって、光量の低下が検出される。

図13～15はLED光量不足検出の実験結果を示している。光量あるいはLED電流が正常の場合、エンコーダ信号とエンコーダ信号に載せたフェールセーフ診断パルスはともに正常に出力する(図13)。

LEDの光量あるいはLED電流が初期値より約30%低下した場合(常温)、フェールセーフ信号に異常が始められる(図14)。LEDの光量あるいはLED電流がもっと下がると(初期値より約50%低下した場合)、フェールセーフ診断パルスが完全に消え、エンコーダ信号しか残っていない(図15)。言い換えると、エンコーダの出力信号がまだ正常であるうちに、そのエンコーダLED発光強度の低下を検出できる。

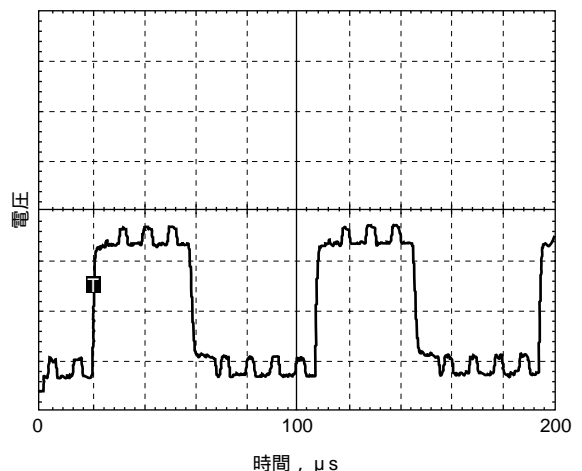


図13 LED駆動電流正常場合のエンコーダ出力  
Encoder output without reduction occurred in LED driving current

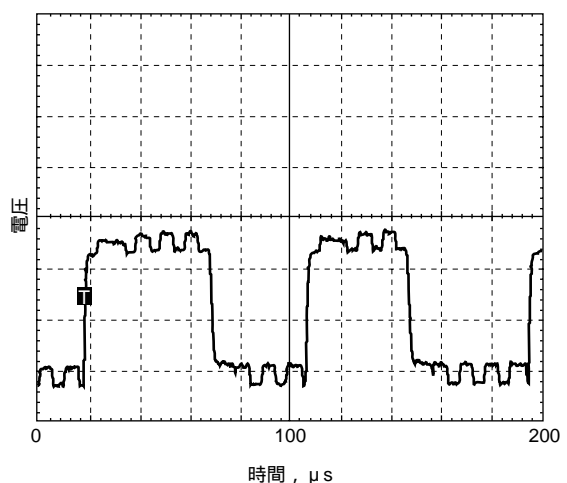


図14 LED駆動電流が30%減少した場合のエンコーダ出力  
Encoder output with LED driving current 30% reduced

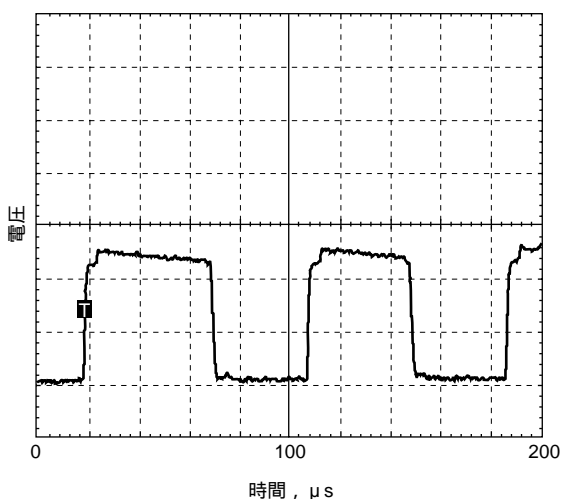


図15 LED駆動電流が50%減少した場合のエンコーダ出力  
Encoder output with LED driving current 50% reduced

3.3 受光部の異常検出

PDは、受光素子が二つ(PD.1とPD.2)存在している。受光素子になんらかの異常が発生した場合、PDの出力は電源電圧の5Vまたは0Vとなる。

この場合、表2、図16、17に示すようにフェールセーフ信号がなくなるため、異常が検出される。

表2 受光部異常の検出

Detecting of the failure occurred in photodiode output

異常内容	Encoder 信号	Fail-safe 信号	異常検出
PD.1出力 = PD.2出力=5V	L	無し	可
PD.1出力 = PD.2出力=0V	H	無し	可
PD.1出力 = 0V, PD.2出力=5V	H	無し	可
PD.1出力 = 5V, PD.2出力=0V	L	無し	可

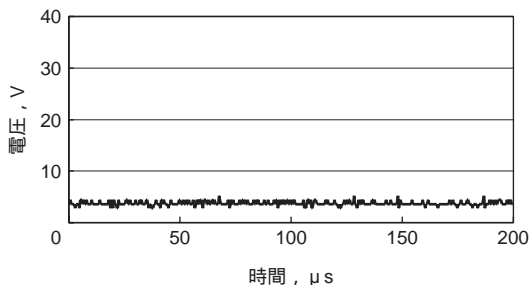


図16 PD異常時エンコーダの出力(ケース1)  
Encoder output with failure occurred in photodiode output (case 1)

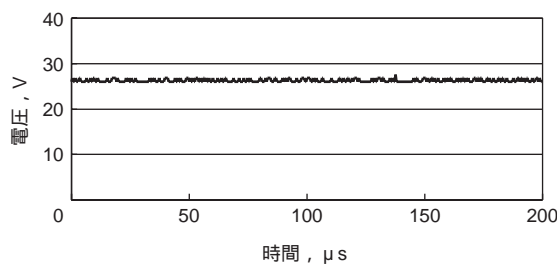


図17 PD異常時エンコーダの出力(ケース2)  
Encoder output with failure occurred in photodiode output (case 2)

3.4 信号処理回路の異常検出

信号処理回路に異常が発生した場合、信号処理回路の出力端子B、Cはデジタル出力であるので、電源電圧の5Vまたは0Vとなる。このため、フェールセーフエンコーダの出力は図18~21に示すように、フェールセーフ診断パルスが断続的に消えてしまう欠落が発生、回路異常が検出される。

具体的に、エンコーダの出力は、回路上B点電圧(図2参照)に異常が発生した場合図18、19、C点電圧に異常が発生した場合図20、21に示す。

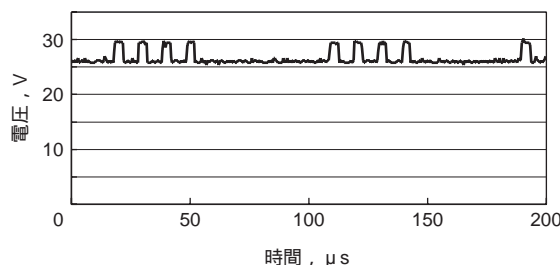


図18 回路内部異常時のエンコーダ出力 (ケース1) [B点電圧 = 5Vの場合]

Encoder output with failure occurred in signal processing circuit (case 1)

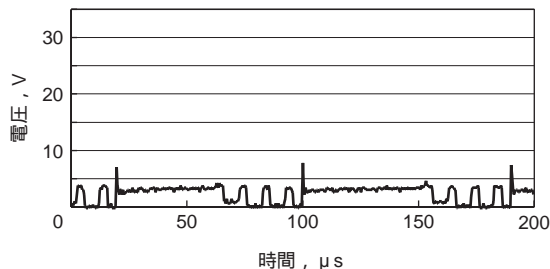


図19 回路内部異常時のエンコーダ出力 (ケース2) [B点電圧 = 0Vの場合]

Encoder output with failure occurred in signal processing circuit (case 2)

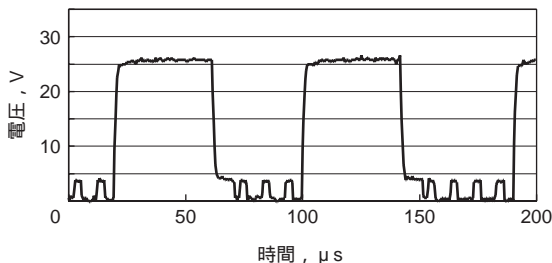


図20 回路内部異常時のエンコーダ出力  
(ケース3) [C点電圧 = 5Vの場合]

Encoder output with failure occurred in signal processing circuit (case 3)

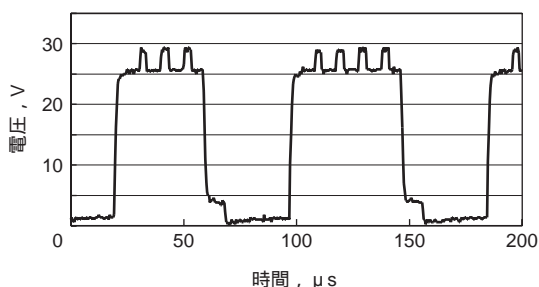


図21 回路内部異常時のエンコーダ出力  
(ケース4) [C点電圧 = 0Vの場合]

Encoder output with failure occurred in signal processing circuit (case 4)

3.5 異常検出回路の異常検出

異常検出回路はもともと回路異常を検出するために設けたのであるが、異常検出回路自身にもなんらかの異常が発生する可能性がある。それを監視するため、異常検出回路を2重化した。

図22～26は異常検出回路に異なる異常が発生した場合フェールセーフエンコーダの出力を示す。いずれの場合も、フェールセーフ診断パルスが完全にまたは断続的に消えてしまうため、検出回路の異常が検出される。

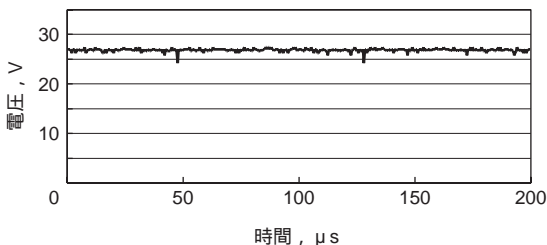


図22 異常検出回路異常時のエンコーダ出力  
(ケース1) [A点電圧 = 24Vの場合]

Encoder output with failure occurred in the failure detecting circuit (case 1)

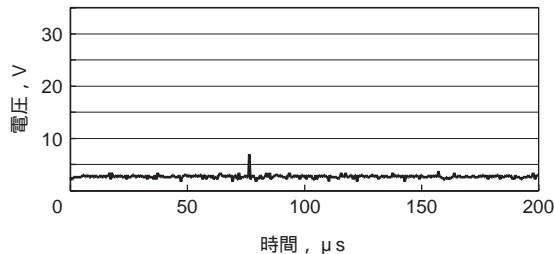


図23 異常検出回路異常時のエンコーダ出力  
(ケース2) [A点電圧 = 0Vの場合]

Encoder output with failure occurred in the failure detecting circuit (case 2)

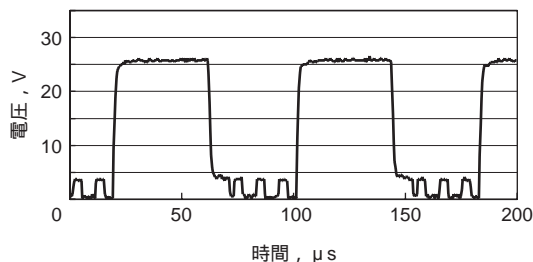


図24 異常検出回路異常時のエンコーダ出力  
(ケース3) [D点電圧 = 5Vの場合]

Encoder output with failure occurred in the failure detecting circuit (case 3)

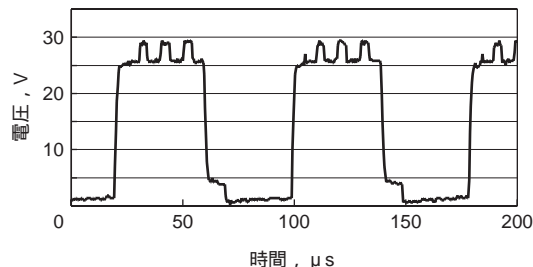


図25 異常検出回路異常時のエンコーダ出力  
(ケース4) [D点電圧 = 0Vの場合]

Encoder output with failure occurred in the failure detecting circuit (case 4)

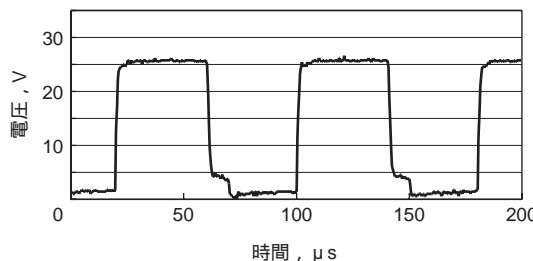


図26 異常検出回路異常時のエンコーダ出力  
(ケース5) [E, F, G, H点電圧 = 0Vの場合]

Encoder output with failure occurred in the failure detecting circuit (case 5)

エンコーダの出力は、回路上 A 点電圧( 図 2 参照 )に異常が発生した場合図 2 2 , 2 3 , D 点電圧に異常が発生した場合図 2 4 , 2 5 , E , F , G , H 点電圧に異常が発生した場合図 2 6 に示す。

なお、D , E , F , G , H 点の電圧はそれぞれ High( 5 V )になり続いた場合、フェールセーフ診断パルスが正常であるが、もしこの時回路内部に異常が発生したら、2 重化した異常検出回路の働きで、フェールセーフ診断パルスも図 1 8 ~ 2 1 のように異常に変わり、発生した回路異常が検出される。

#### 4. おわりに

本報で紹介したフェールセーフエンコーダは、新交通システム A L M の速度制御または速度を監視するために開発され、特に、零速度付近も含め全動作領域での安全性を向上させたものである。

このエンコーダは、従来の光学式ロータリーエンコーダの共通の機能・特性を持つ上に、複数のフェールセーフ機能が付いている。光学系および電気回路などの特別設計によって、エンコーダシャフトの停止・回転に関わらず、エンコーダの断線、発光部・受光部の異常、信号処理回路の異常、そして異常検出回路自身の異常などを検出できるようになっている。

主な応用としては、鉄道車輛の速度制御、位置検出などに使用できる。また、一般産業への応用として安全性が重視される工作機械や電気自動車など様々な幅広い分野が考えられる。

最後に開発に当たってご協力・アドバイスを頂きました日本オーチス・エレベータ株式会社俣野良夫部長殿と和田勝博課長殿に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 和田勝博, 俣野良夫, 梁 ミン: フェールセーフ速度検出器, 電気学会研究会資料, L D - 99 - 83, ( 1999 )77 .
- 2) 水間 毅, 加藤佳仁: 都市交通システムの評価手法の検討, 電気学会研究会資料, L D - 99 - 70 - 81 , ( 1999 )65 .

#### 筆者



梁 ミン\*  
M. LIANG

\* 光洋電子工業株式会社 エンコーダ事業部  
技術部 工学博士