

最近のエンコーダ技術

藤田 光悦(ふじた こうえつ)

中山 智晴(なかやま ともはる)

松添 雄二(まつぞえ ゆうじ)

1 まえがき

サーボシステムの高性能化に伴い、回転位置センサであるエンコーダも大きな変化を遂げている。これの主要因は分解能の飛躍的な向上要求であり、従来標準的に使用されてきた2,048パルスのエンコーダに対して、16ビットエンコーダ(16,384パルス相当)も登場してきた。このような背景のもと、最近のエンコーダの特長は以下のとおりである。

- (1) 小形・高分解能化の実現
- (2) アブソリュート機能の標準搭載
- (3) シリアル伝送による省配線
- (4) インテリジェント化

本稿では、上記の特長を実現するための最新技術を紹介する。

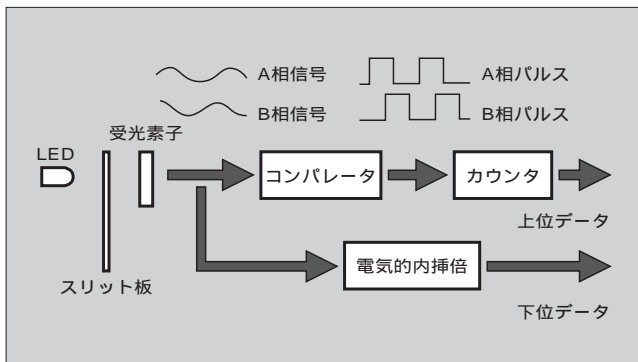
2 光学式エンコーダの高性能化技術

2.1 高分解能化

光学式エンコーダの高分解能化を実現させる方法として、構造的な手法、電気的(信号処理的)手法がある。

構造的な手法にて高分解能化を実現するには回転スリット板のスリットの数を増加させればよいが、エンコーダの小形化との両立を図るには、スリットの面積を小さくする必

図1 高分解能化の例



要があり、各要素部品の加工および組立に高い精度が要求される。最近では電気的手法にて高分解能化を達成する各種方式が提案されており、図1に示すように、2相(A、B相)の擬似正弦波信号を電気的に内挿倍することにより、高分解能を実現する方法が実用化されている。

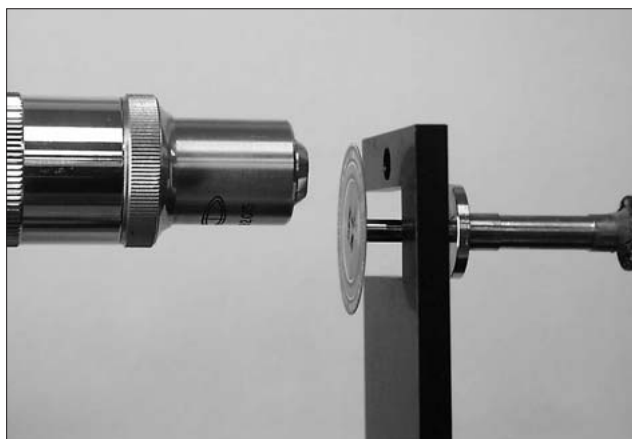
2.2 高精度化

ここでは、図1に示す方法において、高精度化実現のための技術課題について説明する。この方法において、位置検出精度を向上させるには2相の擬似正弦波のひずみをできるだけ小さくすることが要求される。そのためには、検出部を構成する光源(LED: Light Emitting Diode)、スリット板および受光素子の光学特性と位置・寸法関係による影響を解析・最適化する必要がある。

図2に示すようなシミュレータを用いることで、これらの光学的なパラメータに起因する2相信号のひずみ率の影響を定量的に解析することが可能となる。この装置はスリット板を透過した光線の強度分布を二次元カメラで撮像し、この画像データから各受光素子が出力する光電流を演算するものである。

図3は、この装置を用いてスリット板と受光素子の距離をパラメータとしたときの2相信号出力の変化を解析した

図2 光学系解析用シミュレータ



藤田 光悦

交流可変速駆動用電力変換装置ならびに制御装置の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所サーボシステムグループ主任技師。



中山 智晴

交流可変速駆動用電力変換装置ならびに制御装置の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所サーボシステムグループ。



松添 雄二

光応用センサの研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電子機器開発研究所オプトエレクトロニクスグループ。

図3 シミュレーション信号波形

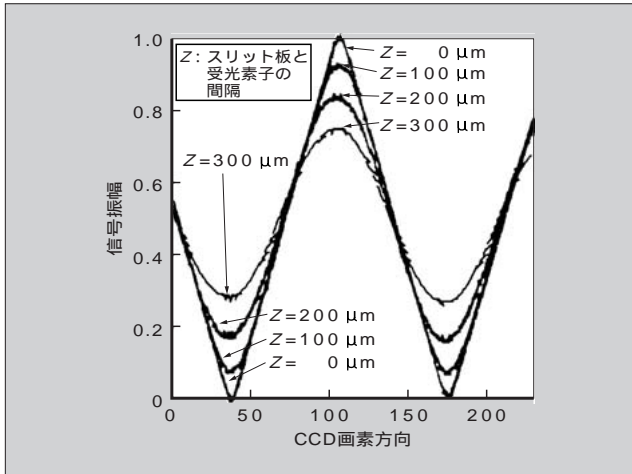


図4 コードパターン列 (3 ビットの例)

	1	2	3	4	5	6	7	8
第1トラック	0	0	0	0	1	1	1	1
第2トラック	0	0	1	1	0	0	1	1
第3トラック	0	1	0	1	0	1	0	1

(a) 純2進バイナリーコード

	1	2	3	4	5	6	7	8
第1トラック	1	0	0	0	0	1	1	1
第2トラック	1	1	1	0	0	0	0	1
第3トラック	1	1	0	0	1	1	0	0

(b) グレイコード

	1	2	3	4	5	6	7	8
第1トラック	1	1	1	0	1	0	0	0

(c) Mコード

結果であるが、これによってひずみ率と振幅から最適な距離を設計できる。

2.3 絶対値化

従来、アブソリュートエンコーダは構造が複雑なため、取扱いが困難、コスト高、などの理由により、限られた分野で用いられていた。

近年、多軸ロボットや無人化工場など機械原点の復帰動作を行うことが困難である用途において、原点復帰動作が不要なアブソリュートエンコーダの適用要求が高まっている。アブソリュートエンコーダを構成するには、1回転内の位置を絶対値で検出する機能(1回転検出)と、電動機軸が回転した回数を計数する機能(多回転検出)が必要となる。多回転検出は、サーボアンプが受電していない場合でも動作を継続する必要があり、このために、エンコーダの外部に設置されたバッテリーから電力の供給を受けている。したがって、多回転検出部は低消費電力であることが要求され、最近ではエンコーダ内に磁石を有し、磁気的に検出する方式が採用されてきている。

通常、エンコーダの代表的な性能は、1回転検出の分解能で示す。したがって、1回転検出での絶対位置検出のアルゴリズムが、エンコーダ全体の構成や性能に大きく影響

図5 グレイコード方式の構成とデータ変換

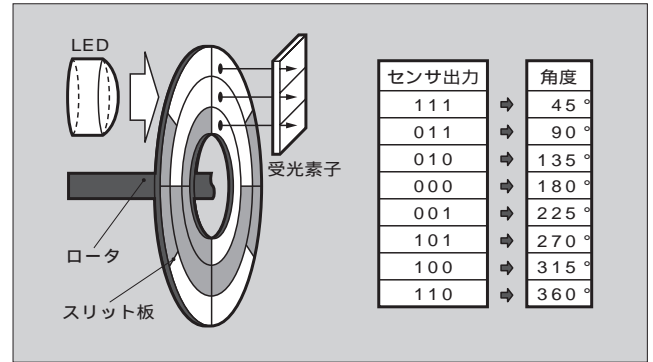
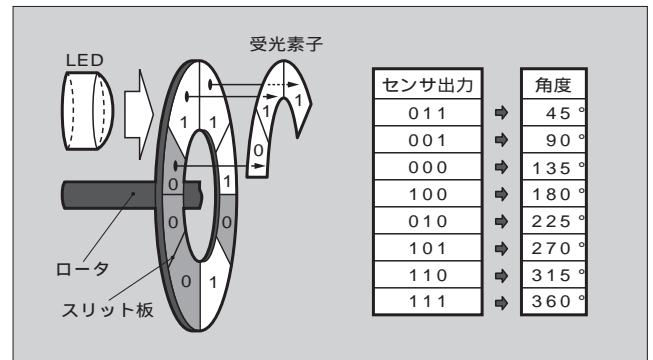


図6 Mコード方式の構成とデータ変換



する。最新のエンコーダにおける絶対位置の検出原理としては以下の2方式がある。

(1) グレイコード式アブソリュートエンコーダ

図4に3ビットの場合を例として各種アブソリュートエンコーダのパターンを示す。グレイコードとは、図4(a)に示す純2進バイナリーコードとは異なり、図4(b)に示すように符号が同時に二つ以上変化しないコードである。この3ビットグレイコードの“1”を透過部、“0”を遮光部とする明暗格子を有する回転スリット板を、図5に示すように同心円状に配置し、これと対向する位置に3個の受光素子を半径方向に1列に配置する。このため、半径方向の小形化が困難という欠点がある。

(2) Mコード式アブソリュートエンコーダ

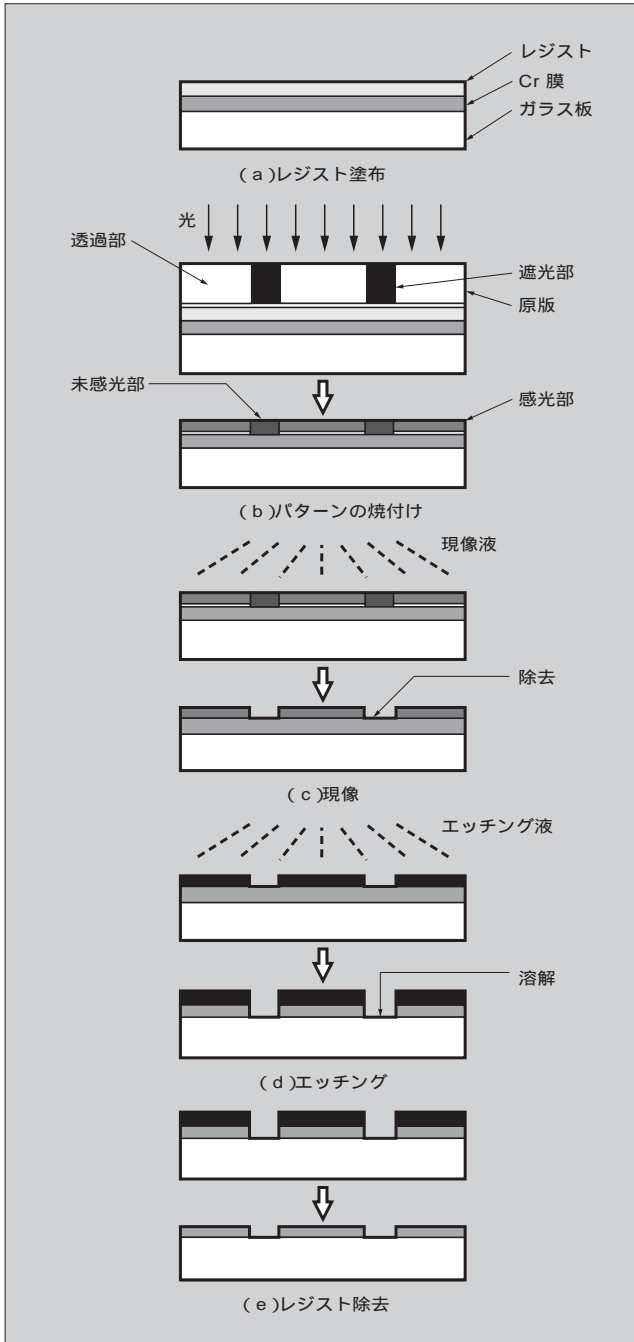
Mコードとは、図4(c)に示すように、1周期あたり2^n個の1,0情報の組合せで構成され、簡単な規則によって作られる乱数コードである。このコードの特定位置から連続するn個の1,0情報はこのコード内で一つしか存在しないため、全周においては2^n個の重複しない情報を持つ。図6にMコードスリット板を用いたエンコーダを示す。この場合、受光素子を円周方向に配置することが可能であり、半径方向の小形化が容易である。

③ 光学式エンコーダの要素技術

3.1 受光素子

受光素子はスリット板を透過した光信号を電気信号に変換するためのトランスデューサであり、一般にホトダイオー

図7 ホトエッチング工程



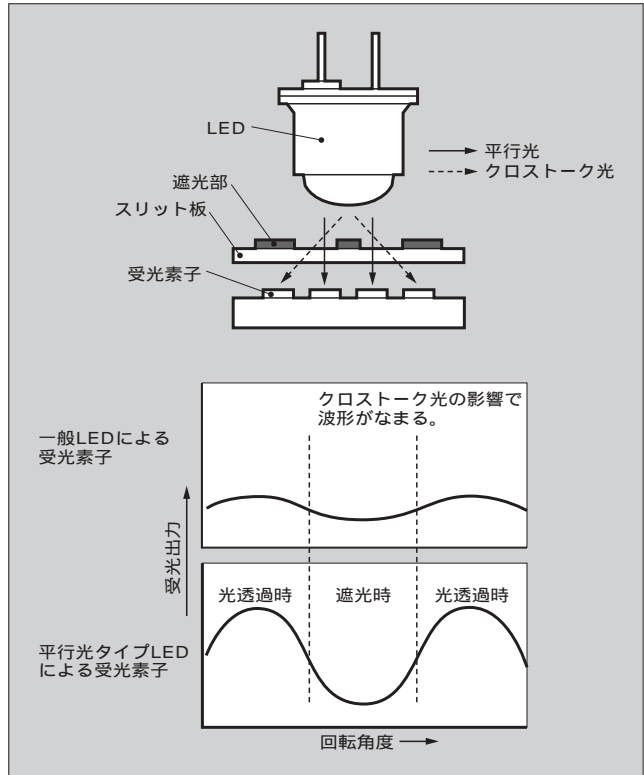
ドとホトトランジスタが用いられる。

ホトダイオードは、シリコン半導体のpn接合部に光が照射されるような構造になっており、主な特長として、応答特性がよい、光-電流特性が線形、低ノイズなどが挙げられる。

ホトトランジスタは、ホトダイオードと増幅用トランジスタを一体化したものである。ホトダイオードの光電流に直流電流増幅率を乗じた大きな信号が得られる反面、ホトダイオードに比べ応答特性が悪い、光-電流特性の個体差が大きいなどの欠点がある。

こうした長短所を補うため最近のエンコーダでは、各受光素子の出力信号の仕様によって使い分ける目的で一つの半導体ウェーハ上にホトダイオードとホトトランジスタを

図8 クロストークの影響



組み込んだものが用いられている。

3.2 スリット板

一般に、スリットのパターン製作には、ホトエッチングを用いているが、ガラス製と金属製のスリット板により製作工程が異なる。

ガラス製のスリット板は、図7に示すように、(a)ガラス面にクロム(Cr)を蒸着したものにレジスト膜をコーティング、(b)パターンの焼付け、(c)現像、(d)エッチング、(e)レジストの除去、などの工程を経てスリットのパターンを形成する。この手法を用いたガラス製スリット板は、エッチング精度がよく、高分解能化に適するが、耐振動や耐衝撃性に弱く、コスト高などの欠点がある。

また、金属製のスリット板は、直接金属をエッチングするため、エッチング精度がガラス製のスリット板ほど高くできず、高分解能化には適さない。しかし、耐振動・耐衝撃性に富み、低価格のメリットがある。

近年では、両者の欠点を埋めるフィルム材料を用いたスリット板が開発されている。

3.3 LED

各LEDメーカーからエンコーダ用LEDとして、数十種類の商品が提供されている。LEDを選定する場合、次の点を考慮する必要がある。

3.3.1 平行光性

クロストーク光成分は、図8に示すようにSN比を低減させ、エンコーダの検出精度が低減する。そのため、平行光を出力できる範囲の広いLEDが好ましい。

表 1 シリアル伝送規格（電気・機械仕様）の比較

方式 評価項目	RS-232C	RS-423	RS-422	RS-485
伝送速度	~ 20 kbps	~ 300 kbps	~ 10 Mbps	~ 10 Mbps
伝送距離	~ 15 m	~ 600 m	~ 1,220 m	~ 1,220 m
伝送動作	不平衡	不平衡	平衡	平衡
最大接続数	1ドライバ/ 1レシーバ	1ドライバ/ 10レシーバ	1ドライバ/ 10レシーバ	32ドライバ/ 32レシーバ

3.3.2 光強度－温度特性

単位順電流あたりの光出力は、温度上昇に伴い低下する。そのため、高温状態でも受光素子に一定の光電流を出力させるためには常温時に比べて多くの順電流が必要となる。しかしながら、LED の順電流増加は LED 寿命を指数関数的に短くするので、エンコーダの長寿命化を実現するために、単位温度あたりの光量減衰が小さな LED が適用されている。

3.3.3 照明むら

受光素子に照明むらがあると、出力する光電流が変化する。特に、図 1 に示すように電気的内挿倍によって高分解能化を行うエンコーダでは、A、B 相信号にひずみが発生し、精度向上の妨げとなる。そのため、照明むらが小さい LED が選択されている。

3.4 構造

エンコーダの電動機軸への取付け方法や回転部分の保持方法の違いにより、シャフト形、中空軸形、モジュラ形などに分類することができ、それぞれ構造が異なる。しかしエンコーダの小形化・交換の容易性などの要求に伴い、中空軸形が主流になりつつある。

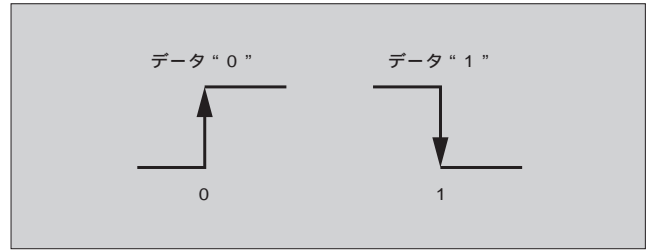
中空軸形は回転軸が中空になっており、電動機軸を中空軸内に直接挿入することができるため、シャフト形に比べ軸方向のスペースを小さくすることが可能である。また、モジュラ形に比べ、エンコーダの取付け・取替えが容易である。一方、電動機軸に密着しているため、熱や衝撃を直接エンコーダ全体に受けるので、耐熱性・耐衝撃性に注意を払う必要がある。

④ エンコーダとサーボアンプ間の通信とインテリジェント化

4.1 エンコーダの通信

エンコーダとサーボアンプ間の通信（以後、エンコーダ通信という）で、従来の A・B・Z パルスなどをパラレルに伝送するパルス伝送方式は、伝送周波数の制約があることから、エンコーダの高分解能化に対応できなくなってきた。一方で、位置データをシリアルで伝送する方式は、基本的に伝送周波数により分解能が制約されないうえに、サーボアンプとエンコーダの間の省配線化もできる。また、シリアル伝送では瞬時瞬時の絶対位置データを伝送するため、パルス伝送の方式に比べて位置ずれに対して伝送線路

図 9 マンチェスタ符号



での信頼性が大幅に向上する。したがって、最近の高分解能エンコーダは、エンコーダとサーボアンプ間の通信に、このシリアル伝送方式を用いることが一般的である。

4.2 エンコーダのシリアル伝送システム

エンコーダ通信は、その通信周期がサーボシステムの応答性能に大きく影響することから、数 M ビット/秒以上の高速データ伝送が要求される。また、伝送路が最大 100 m 前後に達するので、伝送路での電圧降下と耐ノイズ性能に注意が必要である。

シリアル伝送の電気・機械仕様の一般的な規格を、表 1 に示す。RS-422 または RS-485 が、伝送速度、伝送距離、またノイズに強い平衡伝送方式を用いる点において、エンコーダ通信に適しているといえる。使用する符号としては、伝送効率がよく、高速伝送が可能なマンチェスタ符号が多い。この符号は、図 9 に示すような、“0” を信号立ち上がりエッジ、“1” を立ち下がりエッジで示す 2 値符号である。また、通常の位置信号に加えて、巡回符号検査（CRC）データを送信して伝送の信頼性を向上させている。

4.3 エンコーダ通信のシステム構成例

シリアル伝送方式とするためには、光学系などから得られるパラレルの位置検出データをシリアルデータに変換するため、大量のデジタル信号を処理しなければならない。少ない部品点数、かつ小さい実装面積で、このような複雑な処理を実現するためには、CPU（Central Processing Unit）や ASIC（Application Specific IC）が用いられる。

図 10 に、サーボアンプを含むシリアル通信システムのブロック図を示す。エンコーダの CPU は、光学系やその他のセンサで検出される各種信号から、位置検出、故障検出を行うとともに、サーボアンプとの通信のシーケンス処理を行う。通信用 ASIC は、CPU からのデータをパラレル/シリアル変換、トランシーバからのデータをシリアル/パラレル変換、さらに CPU からの通信のシーケンス指令を基にサーボアンプとの通信を制御する。トランシーバは、ASIC 入出力信号を、RS-422 または RS-485 信号レベルに変換する。エンコーダ同様、サーボアンプ側にも、トランシーバ、通信用 ASIC、CPU などの、エンコーダと対となるシステムが必要となる。サーボアンプでは、このシステムで、エンコーダから位置データ、エンコーダ故障データを受け取るとともに、エンコーダ通信の全体のシーケンスを制御する。

図 10 シリアル通信ブロック図

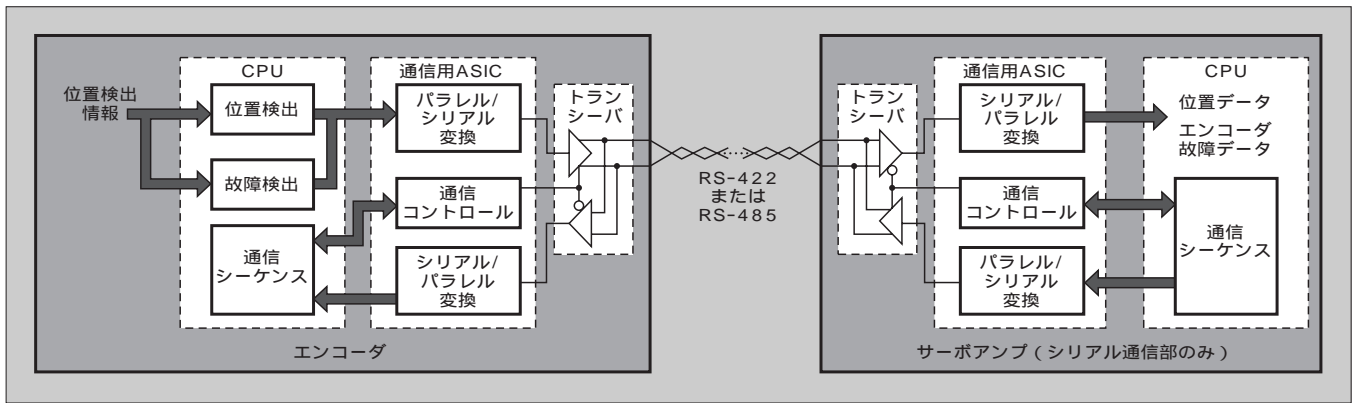


表 2 自己診断機能一覧

機能	概要
電動機形式出力	電動機の形式をサーボアンプに通知 (サーボアンプ形式との整合をチェック)
通信異常検出	サーボアンプにて、伝送路の断線、CRC (Cyclic Redundancy Checks) エラーなどを検出
過熱検出	エンコーダ内温度が設定値以上となっていることをサーボアンプに通知
パルス数異常検出	1回転のパルス数が所定値に対し、過不足が生じたことをサーボアンプに通知

4.4 エンコーダのインテリジェント化

エンコーダに CPU や ASIC を設けることで、1 台のエンコーダに、多種多様な機能を持たせることができるようになった。これによって、エンコーダならびにサーボアンプに位置検出器としての自己診断機能を持たせて、RAS

(Reliability, Availability, Serviceability) 情報をサーボアンプに知らせることにより、速やかにかつ安全にサーボモータを制御することが可能となっている。表 2 に自己診断機能の一例を示す。これらにより位置検出器の RAS 機能は大幅に向上する。

5 あとがき

工作機械、半導体製造装置、産業用ロボットなどに限らず、各種製造機械に適用される高性能サーボシステムに対応するエンコーダ技術について述べた。今後もさらに高分解能化の要求は進んでいくと思われるが、富士電機においても、受光素子やスリットパターン等の微細化技術はもちろん、最新オプトエレクトロニクス技術を適用し、さらなる高分解能化を達成するとともに、低コストで信頼性の高いエンコーダを開発していく所存である。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。