

堅牢な耐障害型 モーションコント ロールフィードバック システムの設計

最近の工業用アプリケーションでは、信頼性が高く堅牢で、1日24時間、1年365日、厳しい状況下で稼働するロボットや自動機械が要求されます。こうしたシステムでは、今までよりも高精度なモーター制御やフィードバック制御が必要とされ、そのような高性能の実現はさまざまな新技術やマイクロエレクトロニクスによって支えられています。これらの新技術を利用すると、共有作業空間におけるロボットの衝突を避けたりタスク割当を効率化したり、サーボ精度を高めることが可能で、堅牢な自動システムが構築できます。

システムが堅牢な運用性を持つかどうかを左右するのは、機械的・電気的障害が発生したときの処理方法です。このアールティクルでは、フィードバックパスに直交エンコーダを持つ堅牢な耐障害型モーションコントロールシステムの設計方法を紹介します。

サーボシステム

最近の自動システムでは、閉ループフィードバックによってモーションコントロールを行っています。通常そうしたシステムは、モータドライバとフィードバックシステムからなるサーボシステムを備え、スピードや位置を正確かつ安定的に制御します。サーボシステムの多様なシステムレベルコンポーネントは図1のとおりです。

高速・高性能のアプリケーションでは、DCブラシレスモーターが使われます(要求の厳しくない低速アプリケーションには、DCブラシモーターやステッピングモーターが適しています)。このアールティクルでは、ブラシレスモーターを使うことを前提とします。ブラシレスモーターの多くは、エンドシャフトにシャフト速度を検出する直交エンコーダを持つとともに、モーターの coils 切り換えを制御する整流ポイントを持っています。詳細は、8ページの「フィードバックエンコーダ形式」を参考にしてください。回転シャフト側にも、位置データ取得用の直交エンコーダがあります。これは、ギアボックスや親ねじにバックラッシュがあり、モーター・シャフト位置と回転シャフト位置に誤差があるためです。

モーションコントローラカードやモーションコントローラモジュールは、通常モーションコントロールIC、マイクロプロセッサ、高速エンコーダ信号を処理するDSPがカスタムASICで構成されます。このコントローラで速度信号

や移動・回転方向信号を生成し、ドライバがアンプによってモーター駆動用の電圧/電流(電力)を供給します。フィードバック回路を持つモーションコントロールシステムの信頼性を高め、堅牢なシステムにするためには、設計時に以下の項目についてシステムレベルで対応する必要があります。

- コントローラ-エンコーダ入力回路(レシーバ回路)
- レシーバ回路のプリント基板レイアウト
- エンコーダ信号経路

今回のアールティクルでは割愛していますが、この他に、物理的配線によって組み込まれた緊急停止入力や制限入力などのモーションコントローラ入力についても検討が必要です。

コントローラレシーバ回路

モーターの直交エンコーダからモーションコントローラのレシーバ回路には、6種類のRS-422/RS-485信号(A、 \bar{A} 、B、 \bar{B} 、INDEX、 \bar{INDEX})が送られます。これがエンコーダ入力になります。受け取ったRS-422信号は(システムにはトランスミッタが1つしかないので、RS-422信号だと仮定しています)、まず、論理レベルの信号に変換し、モーションコントローラ回路に供給し、処理を行います。なお、RS-422とRS-485の違いについてはオンラインのチュートリアル、"RS-485 (EIA/TIA-485) Differential Data Transmission System Basics"(英文。www.maxim-ic.com/an736にあります)をご覧ください。このレシーバ回路は、開放や短絡、ノイズなど、サーボシステム環境で発生するさまざまな障害に対応できる必要があります。障害やESDの詳細は、7ページの「障害の種類」を参考にしてください。

図2は典型的なモーションコントローラにおけるエンコーダ入力レシーバ回路です。U1は、10Mbps、5VのクワッドRS-422/RS-485レシーバで、 ± 15 kVのESD保護を内蔵

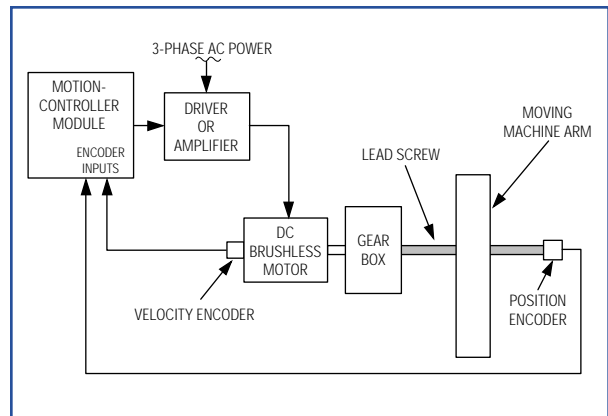


図1. 直交光学式エンコーダを使って、速度情報と位置情報をモーションコントローラにフィードバックするDCブラシレスサーボシステムの例。

しています。エンコーダ入力が入力部に接続された障害耐性システムにするためには、ESD保護が必要です。ESD保護を内蔵した結果、保護用外付け部品が不要になり、プリント基板を小型化できるようになりました。

直交エンコーダから対のコンプリメンタリ信号がツイストペアケーブルで伝達されますが、その終端処理には150Ωの抵抗を使用します(ケーブル終端処理については後述します)。ツイストペアケーブルが破損したり取り外されたりすると開放障害が発生しますが、モーションコントローラが適切な対応をするためには、この開放障害を検出する必要があります。フェイルセーフを実現するために、入力ペアに開放障害が発生すると、MAX3095レシーバ出力がロジックハイにアサートされます。1kΩの抵抗は、レシーバの"B"入力に対し、"A"入力の電位を200mV以上バイアスするためのものです。入力終端抵抗に対してフェイルセーフ出力とするためにも必要です。なお、この回路には、ESD保護と開放検出、出力短絡保護の機能がありますが、入力短絡検出機能はありません。

この回路の改良型が図3です。2つのICは、それぞれ、3つのRS-422/RS-485レシーバを持ちます。各レシーバは、

障害検出と±15kV ESD保護の機能と32Mbpsのデータ伝送速度を持ちます。MAX3098Eでは、エンコーダ入力の開放と短絡も検出できます。その他に低電圧差動信号やコモンモードレンジ違反なども検出できます。どのレシーバ入力で障害が起きたかは、論理レベル出力から知ることができます。このように障害を直接知ることができるため、ソフトウェアオーバーヘッドが削減できるとともに外部論理コンポーネントも最小限に抑えることができます。

エンコーダ入力に障害が発生すると、対応する出力(ALARMA、ALARMB、ALARMZのいずれか)がロジックハイになります。サーボシステムは動きが遅いため、直交エンコーダ信号がゼロ近傍となる領域で過渡障害が発生し、「偽障害」の引き金となることがあります。このため、コンデンサC_DELAYによってALARMD出力(ALARMAとALARMB、ALARMZの論理OR)を適当な時間、遅延できるようになっています。RS-422ケーブルの終端処理は、120Ω抵抗で行います。ICは16ピンQSOPパッケージで外付け部品が少なく、非常にコンパクトに実装できます。

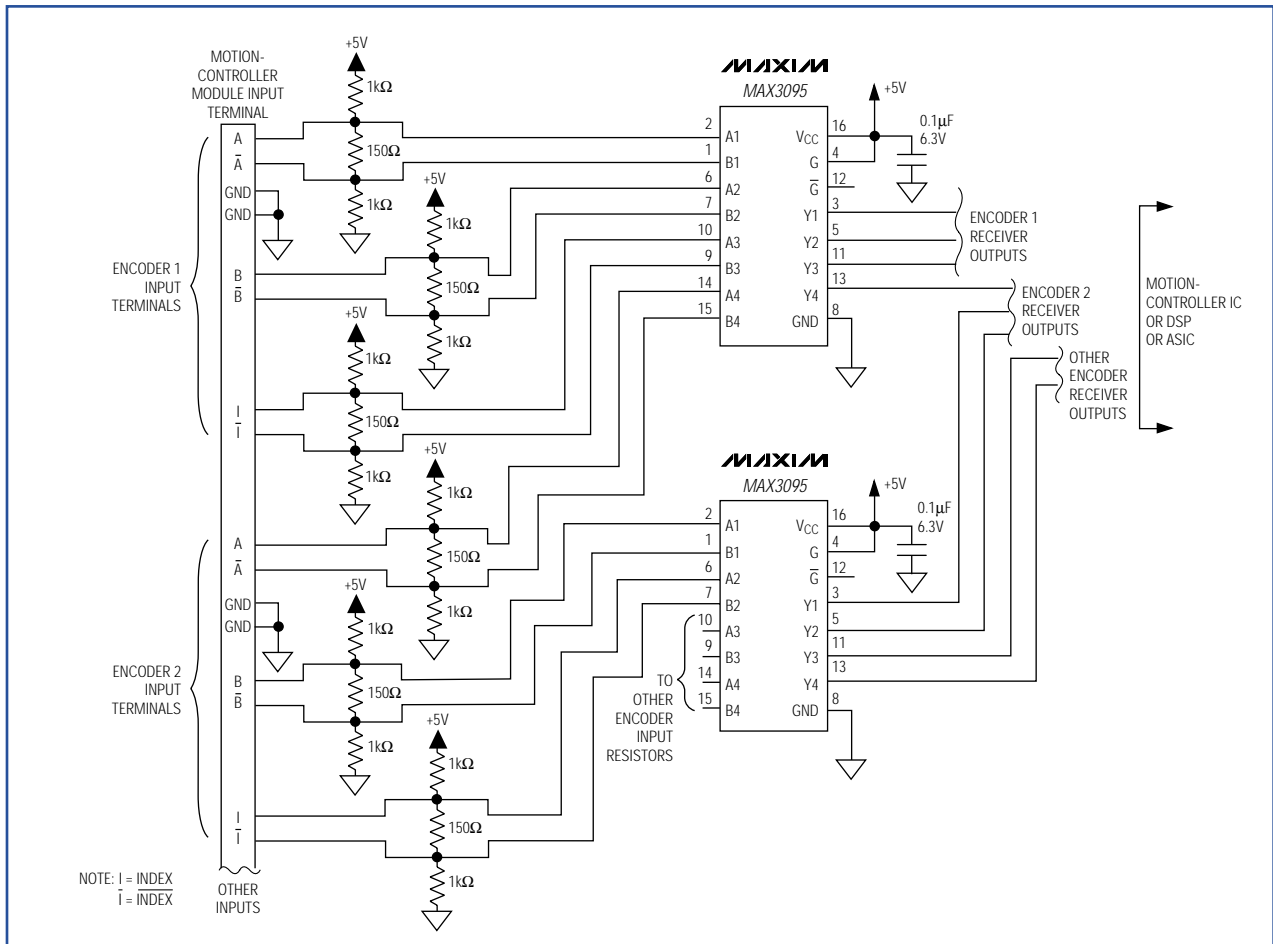


図2. モーションコントローラの一部であるエンコーダ入力レシーバ回路で、エンコーダ入力ラインのすべてに対して開放検出とESD保護(MAX3095内蔵)を装備。

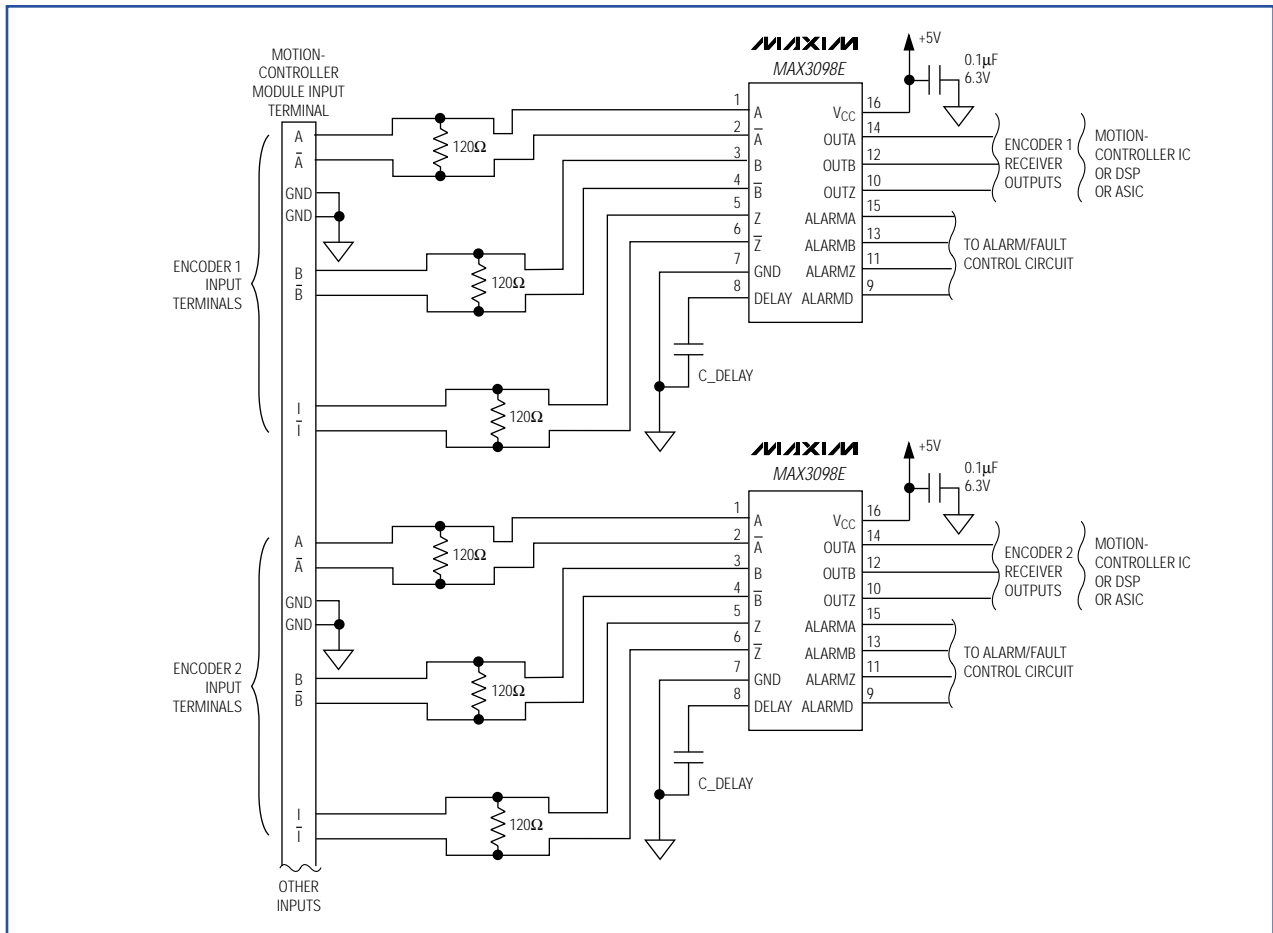


図3. 図2に示した回路の改良型で、開放障害と短絡障害、中間障害が検出できるとともに、エンコーダ入力ラインのすべてに対してESD保護が施され、また、アラーム/障害の遅延出力も装備。

レシーバ回路のプリント基板レイアウト

レシーバ回路を適切にレイアウトするためには、まず、RS-422エンコーダの入力コネクタについて考える必要があります。入力コネクタの隣り合ったピンにAと \bar{A} 、Bと \bar{B} 、INDEXと \bar{INDEX} という差動信号ペアを接続する必要があります。こうすれば差動信号ペアの信号・電流帰路がオーバーラップしてキャンセルし合うため、信号の不平衡を最小限に抑えることができます。コンポーネント配置の典型例を図4に示します。プリント基板上のトレースは、差動ペアごとに接近させ、長さを等しくするとともに曲がりが対称となるようにして、各トレースが持つ寄生容量が等しくなるようにします。

デジタル出力に発生する誘導性・容量性のクロストークを最小限に抑え、インダクタンスを引き下げるため、コネクタやレシーバ回路からのRS-422差動信号ラインの下のプリント基板内にソリッドグランドプレーン層を設置します。このグランドプレーンには、大電流信号を流してはいけません。

モーションコントローラ回路で電流のスイッチングを高速で行うと、コモンモードノイズが発生することが

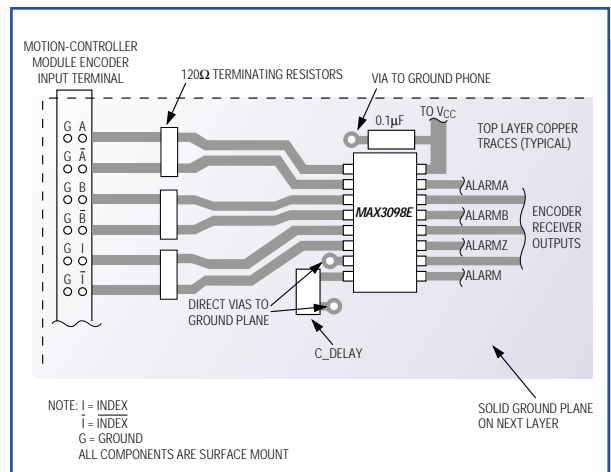


図4. 障害検出機能を持つトリプルRS-422/RS-485レシーバのMAX3098は、モーションコントローラの入力に必要なプリント基板配線やコンポーネント配置が容易です。

あります。このコモンモード電圧は電源ラインに乗って伝わってきますが、その影響は、フィルタやバイパスコンデンサによって軽減することができます。たとえば、0.1 μ FのバイパスコンデンサをレシーバのV_{CC}入力の近くに取り付けます。バイパスループのインダクタンスを最小限に抑えるため、バイパスコンデンサの設置側リード線はソリッドグランドプレーンに直接接続します。そのすぐ横にビアを作り、ICのグランドピンもそのビアを通じてグランドプレーンに直接接続します。また、レシーバ回路に対するノイズカップリングを最小に抑えるため、レシーバ回路のトレースは、電源回路の近くを避けて設置します。

エンコーダ信号用ケーブル

直交エンコーダからの差動信号は平衡信号なので、通常のペアケーブルが使えます。それでもツイストペアケーブルを使うことを推奨します。ツイストペアケーブルは、数メガヘルツまでの範囲でインダクタンスカップリングが非常に小さくインピーダンスも一定であるという特長を持つためです。その結果、非常に高速なモーションコントロールシステムが構築できます。電磁干渉(EMI)の原因にもなりにくく、EMIの影響も受けにくいという利点もあります。

ツイストペアケーブルには、シールドタイプとシールドなしのタイプがあります。シールドなしのケーブルは細くて安価、軽量で、小さな曲率まで曲げられます。しかし、直交エンコーダの差動信号では、シールドタイプを使う必要があります。シールドにより耐EMI性が高められているため、コモンモード除去性能が高いからです。現実のツイストペアケーブルではツイスト状態が理想的ではないため、シールドなしではEMIノイズが大幅に増加してしまいます。シールドタイプケーブルのシールドワイヤは、エンコーダ入力コネクタ近くのグランドプレーンに接続します。

エンコーダの信号ケーブルには、電力レベルの信号など、不要な信号を流してはいけません。また、60Hz電源のように電力レベル信号やノイズの多い信号が流れているケーブルやコンジットの近くを通したり、平行に設置してはいけません。

最新の高速サーボコントロールシステムでは、エンコーダのデータ伝送速度が数メガヘルツにも達します。これほどの伝送速度を実現するためには、エンコーダ信号用ケーブルのレシーバ端に適切な終端抵抗や終端回路を設置する必要があります。理想的な終端抵抗の値は、ケーブルの特性インピーダンスと等しい値です。

RS-422ネットワークにはトランスミッタ(エンコーダ出力)が一つしか存在しないため(トランスミッタ1つとレシーバ1つ)、トランスミッタ側の終端抵抗は不要です。一方、レシーバ入力の終端処理をしないとリングングや反射が発生し、データのスループットが数百キロビット/秒程度まで落ちてしまう危険性があります。通常の場合は、ケーブルの特性インピーダンスから $\pm 20\%$ 以内までマッチングすれば十分です。図2と図3には、エンコーダケーブルの終端処理方法も示してあります。

このようにすれば、堅牢な耐障害型モーションコントロールフィードバックシステムに高速サーボシステムが設計できます。モーションコントローラには、発生するさまざまな障害に対応できるレシーバ回路を持たせるとともに、レシーバ回路の基板レイアウトをエンコーダデータのノイズ問題が防止できるようにする必要があります。直交エンコーダからの信号ケーブルシステムも重要で、そのレシーバ回路端で適切に終端処理を行う必要もあります。このような対策を講じれば、堅牢なモーションコントロールフィードバックシステムを構築し、障害が発生しても予測可能で安定した動作を得ることができます。

用語解説

バックラッシュ：ギアかみ合わせ部の機械的遊びです。

インデックス：直交エンコーダの1回転ごとに1パルスを発生する出力信号。

ラッチアップ：IC動作の完全な故障や一時的な動作不能を意味します。

分解能：出力信号のビット数。直交エンコーダでは、1回転あたりのサイクル数。

参考文献

Barnes, John R., *Electronic System Design, Interference And Noise Control Techniques*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1987.

“New RS-485 IC Increases System Reliability and Fault Detection in Motor-Control Circuits,”
www.maxim-ic.com/an578.

Thomas, Sokira J. & Jaffe, Wolfgang, *Brushless DC Motors, Electronic Commutation and Controls*, Blue Ridge Summit, PA, TAB Books Inc., 1990.

関連記事が、2003年2月3日号の*Electronic Design*に掲載されています。

障害の種類

システムレベルで発生する最もはっきりとわかる障害は、開放と短絡、そして、その中間状態です。多くの場合、モーターやフィードバックエンコーダとサーボシステムのコントローラやアンプは、100メートル以上も離れています。この距離を長いケーブルが走っており、その両端にはコネクタが付いています。そして、ワイヤがコネクタからはずれたり、コネクタが破損したり、ふとしたことでケーブルが切れたりすることがあります。機械振動などによってコネクタが破損したりワイヤが切れたりすると開放障害や短絡障害が発生しますが、いきなり完全に開放したり短絡したりするわけではなく、その前に、スイッチのコンタクトバウンスと似た開放/再接続サイクルや短絡/開放サイクルが何回も発生するのが普通です。また、フィードバック用エンコーダ信号の伝送にはツイストペアがよく用いられますが、ツイストペアを流れる差動信号間が短絡する短絡障害がよく発生します。

中間障害は、フィードバックケーブルの電気抵抗や静電容量が増大した場合に発生します。原因としては、ケーブルの敷設方法が悪く、ケーブルが強く圧迫されているなどが考えられます。稼働後にも同様の問題が起きる可能性があります。たとえば、ケーブルジャケットが破損して水分が侵入すると、ケーブルの静電容量がしだいに増加し、信号強度が低下していきます。このような事態は、機器の水洗いが毎日行われる重工業環境ではよくあることです。ケーブル性能がある程度低下しても、ケーブル自体は運用可能です。ただし、念のため、水分障害を検出する回路を実装しておいたほうが良いでしょう。

ノイズ障害は対策が最も困難なものです。ノイズの原因が、電磁干渉(EMI)や無線干渉(RFI)、システムレベルのグラウンドループというさまざまな要因が絡み合ったものだからです。システムレベルのノイズソースには、以下のようなものがあります。

- 整流時にDCモーターのブラシで発生するアーク放電
- PWMモーターアンプで発生する高速dv/dtスイッチングノイズ
- 大電力のリレーやスイッチ、アクチュエータ(ソレノイドなど)
- 60HzのACサイクルでSCRやTRIACに発生するランダムなターンオン
- 電源の切り換え
- 静電気の放電(ESD)

ノイズレシーバ(アンテナ)となるのは、長いケーブル、接地箇所、高インピーダンスの長いプリント基板トレース、トランスなどです。ノイズソースとノイズレシーバの間に、容量性、誘導性、導電性の結合があると、ノイズ問題が発生します。容量性結合が発生しやすいのは

高インピーダンス回路で、アースされていないワイヤなどの金属片が電界を発生させたり電界の影響を受けたりします。容量性結合でノイズ問題が発生するのは、回路のループインピーダンスが空気のインピーダンス(376.7)を超えているときです。

誘導性結合が発生しやすいのは、ループインピーダンスが376.7以下の低インピーダンス回路です。ワイヤや空芯コイル、トランスなどが磁界を発生させたり磁界の影響を受けたりしてEMIノイズが発生します。対策としては、設計時や設置時に電流ループを抑える努力が必要です。

導電性結合によるノイズは、グラウンドから回路に侵入します。DCノイズはグラウンドプレーンのDC抵抗が最も小さい経路を通じて侵入し、AC結合ノイズはインピーダンスが最も小さい経路を通じて侵入します。その結果、回路の基準点となるグラウンドの電圧が設計値と異なった値になってしまったり、ひどい場合には変化し続けることにもなります。

AC電源の中性ラインとシステムレベルのグラウンドの間にグラウンドループが生成すると、グラウンド電流が流れ、ランダムなノイズが発生します。グラウンド電流の原因となり得るのは、電位差や他のケーブルやデバイスからの誘導作用、配線上の問題、グラウンド障害、工業用環境でよくある機器からの漏れなどです。

コモンモードノイズは電源に接続されていない、またはハイインピーダンスを示すノードに共通するもので、ACとDCの両方があります。これはシステム設計の工夫で完全に無くすることが不可能なノイズですが、ほとんどの場合、誘導性結合あるいは容量性結合により外部ソースとカップリングされていることが多いのも事実です。たとえば、アナログセンサからの信号ワイヤペアのすぐ脇に60Hzの電源ラインを並べると、誘導性結合が発生して、60Hz信号がセンサ信号に混入し、弱いセンサ信号が読みとれなくなります。

静電気の放電(ESD)は、材質の異なる部品が接触し、電荷を交換してから離れることにより、部品間に電圧が生じると発生します。メンテナンスなどでケーブルをコネクタに抜き差しすると、ESDが発生し、コネクタに接続されたICピンに影響を及ぼすことがあります。

ICピンにESDがかかると、ラッチアップが発生したりIC自体が破損したりします。ラッチアップが起きると大電流が流れ、電源の電流制限機能が働いたり、システム全体がシャットダウンすることもあります。ESD保護機能を持たないICのピンを外部信号やコネクタに接続する場合には、MOSバリスターによるESD保護がTransZorbsなどのシリコンアバランシェサプレッサを組み込む必要があります。ESD保護機能を内蔵したICなら、プリント基板が小さくてすみ、小型化や工業用エンクロージャへの組み込みが容易になります。

フィードバックエンコーダ形式

サーボシステムで正確な位置決めを行うためには、フィードバックループを閉じるフィードバック信号が必要です。このようなフィードバック信号を生成する機器には、光学式エンコーダやリゾルバ、磁歪式直交リニア変位センサなどがあります。この他に、アナログタコメータや誘導発電機、ホール効果ピックアップ、電位差デバイスなどもありますが、これらに関する説明は割愛します。

光学式エンコーダはデジタルなフィードバック信号(方形波)を生成するもので、直交型(インクリメンタル)と絶対型、疑似乱数型があります。光学式エンコーダは、ふつう、エミッタと検出器、コードホイールで構成されています。コードホイールで生成される信号が、エンコーダの処理回路に供給するアナログ信号となります。この信号をコンパレータでデジタル出力に変換します。デジタル出力の形式は、オープンコレクタ出力と、シングルエンド出力用の5V~24V論理出力があります。耐ノイズ性が高いのは、コンプリメンタリの差動信号であるRS-422です。

直交光学式エンコーダが生成するフィードバック信号には、AパルスとBパルス、Zパルスがあります。AとBはエンコーダのコードホイールから位相が90度ずれており、いわゆる直交信号になります(つまり、1/4周期ずつずれています)。A、Bの順に正転すると時計方向、逆なら反時計方向にエンコーダが回転しているということです。つまり、AとBの信号から位置と方向、速度のデータが得られます。Z信号はモーターのロータ位置を示すもので、Z信号が表れるたびにエンコーダシャフトが1回転したことになります。また、A信号とB信号のカウントミスチェック用にも使用できます。RS-422では、A、B、Zのそれぞれについてコンプリメンタリ信号がエンコーダから出力されます。

絶対光学式エンコーダでも直交光学式エンコーダと同じような信号処理が行われますが、出力が1回転ごとに1バイナリワードの平行信号が生成されます。よく使われる出力形式は12ビットか13ビットのBCD、グレイ、自然2進コードです。13ビット出力にすると周波数応答は低下しますが(12ビットなら1200 RPMに対して13ビットでは600 RPM)、360度1回転あたりの分解能は高くなります。このタイプのエンコーダは、機器の始動中や停止中にシャフト位置をモニタリングしたい場合によく使われます。これは、直交エンコーダとは異なり、絶対エンコーダでは、エンコーダが動かなくてもシャフト位置を読みとることができるからです。

最近登場した疑似乱数型光学式エンコーダは、3種類の出力信号を生成します。信号Aと信号Bは方向と空間タイミングを示し、3番目の出力が位置を示します。疑似乱数型光学式エンコーダで位置を検出するためには、1~2度、回転する必要があります。

リゾルバもフィードバックエンコーダの一種で、正弦波と余弦波を出力します。サーボコントローラでは、この信号を処理して速度データと位置データを取得します。リゾルバでは、シャフトの回転中に絶対的な位置を示すフィードバック信号が得られますが、低速時の性能は良くありません。一番の問題は、信号処理前にリゾルバ信号をデジタル化する電子機器が比較的高価であることです。

最後の磁歪式直交リニア変位センサ(LDT)は、他のエンコーダとは異なり、回転運動ではなく直線運動を計測するためのフィードバックエンコーダ/トランスデューサです。LDTから突き出た線形変位ロッドに取り付けられた磁石が移動すると磁歪ガイドワイヤで電流パルスが生成し、位置を示すアナログ信号が生成します。この反射パルスをピックアップセンサで検出し、センサ信号をデジタル化して、直交エンコーダと同じA、B、Zの直交出力信号を生成します。