
信号最大化: 組み込み演算増幅器の理解と使い方

序説

著者: Robert Perkel and Kevin Kilzer, Microchip Technology Inc.

演算増幅器は幅広い信号処理応用で使われる一般的な外部アナログ構成要素です。けれども、信号系設計時、組み込み演算増幅器の使い方とデバイスの性能特性が応用で何を意味するかを理解することが重要です。この文書は一般的なアナログ特性と組み込み演算増幅器の回路構成のいくつかを網羅します。

本書は一般の方々の便宜のため有志により作成されたもので、Microchip社とは無関係であることを御承知ください。しおりの[はじめに]での内容にご注意ください。

目次

序説	1
1. 演算増幅器の基礎	3
1.1. 個別と統合の演算増幅器	3
1.2. 信号利得と雑音利得	3
2. 単一演算増幅器構成	3
2.1. 利得1/電圧フォロワ	3
2.2. 非反転増幅器	4
2.3. 反転増幅器	4
2.4. シュミットトリガ	4
3. 複数演算増幅器構成	4
3.1. 縦列増幅器	4
3.2. 差動増幅器	5
3.3. 計装増幅器	5
4. 一般的な実装情報	5
4.1. 抵抗選択	5
4.2. 信号余裕とA/D変換器	5
4.3. 容量性負荷と安定性	6
4.4. 混合した信号入出力での影響	6
5. 性能特性	6
5.1. スルーレート	6
5.2. 開路利得	7
5.3. 利得帯域幅積 (GBWP)	7
5.4. 出力振れ幅	7
5.5. 電圧変位	7
5.6. 入力バイアス電流	8
5.7. 同相入力電圧	8
5.8. 雑音	8
6. 高度な演算増幅器応用	9
6.1. 電圧制御電流源	9
7. 更なる情報	9
8. 改訂履歴	9
Microchipウェブ サイト	10
製品変更通知サービス	10
お客様支援	10
Microchipデバイスコード保護機能	10
法的通知	10
商標	11
品質管理システム	11
世界的な販売とサービス	12

1. 演算増幅器の基礎

演算増幅器は安価で高性能のためアナログ設計での一般的な構成要素です。演算増幅器回路の目標は反転(負)入力上の電圧を非反転(正)入力上の電圧と一致させることです。反転入力上の電圧が非反転入力よりも低い場合、演算増幅器は回路内の帰還を通して誤差の補償を試みるように出力電圧を増します。

この動きは通常、1つの入力に印加される電圧が他の入力と一致するため回路分析に有用です。演算増幅器の別の有用な動きはそれらの外部的な高入力インピーダンスです(いくつかの特殊な演算増幅器形式はこの規則を破ることができますが、それらはこの文書の範囲外です)。高入力インピーダンスは演算増幅器入力の入力バイアス電流を最小に保ち、多くの汎用応用でそれを無視できるほどにします。

性能と特性で変わる多くの異なる形式と基本構造の演算増幅器があります。例えば、0変動演算増幅器は電圧変位が非常に小さく、温度に渡って外部的に安定なように設計されています(より多くの情報については「[電圧変位](#)」をご覧ください)。特に明記しない限り、この文書はマイクロコントローラに組み込まれた汎用演算増幅器に集中します。

1.1. 個別と統合の演算増幅器

最も重要な設計上の決定の1つは個別演算増幅器または統合(組み込み)演算増幅器周辺機能のどちらで行うかです。これらの解決策の各々はそれらが設計に対して正しい手法かどうかを評価するのに使われ得る特定の強みを持ちます。

1.1.1. 個別演算増幅器

個別演算増幅器を使う主な恩恵は高いアナログ性能です。個別演算増幅器はマイクロコントローラと入出力ピンを共用する必要がなく、それらのアナログ性能を強化するためにダイ全体の領域を使うことができます。加えて、個別演算増幅器は0変動、計装、電流検知のような特殊な構成と基本構造で利用可能です。更に、個別演算増幅器は双極電源を利用することができます。

注: 1. 統合演算増幅器は減らされたアナログ性能で同様の構成に設定することができます。より多くの情報については「[3.3. 計装増幅器](#)」をご覧ください。

2. 統合演算増幅器は或る回路構成に於いて電流検知を実行することができます。

1.1.2. 統合演算増幅器

統合演算増幅器の一番大きな利点は設計領域と部品数の削減です。演算増幅器がマイクロコントローラのダイ上なので、PCBで1つの外圍器だけが必要とされます。統合解決策の別の恩恵はマイクロコントローラの統合です。個別解決策と異なり、マイクロコントローラ上の演算増幅器は他の周辺機能のようにデジタル的に構成して制御することができます。デバイス系列に応じて、この統合は以下のような機能を制御するのに使うことができます。

- ・ 電力ON/OFF
- ・ 信号利得制御 (統合された梯子型抵抗を持つデバイスで利用可能)
- ・ 出力状態 (デバイスによって変化、これはHi-Z(3状態)出力、強制されたGNDやVDDの出力水準)

1.2. 信号利得と雑音利得

演算増幅器で作業する時に使われる一般的な用語は利得としても知られるAvです。具体的に、Avは次のように入力信号に対する出力信号の比に等しい信号利得を示します。

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

演算増幅器で時々使われる別の用語は雑音利得(NG:Noise Gain)と呼ばれます。NGはデバイスの入力と直列の小さな寄生電圧源から見た利得です。周波数でのNG応答を分析することにより、演算増幅器回路の安定性を測定することができます。

NGの別の使い方は周波数での信号雑音比(SNR:Signal-to-Noise Ratio)での変化を予測することです。いくつかの演算増幅器の構成は利得1や非反転増幅器のようにAvとNG間で平坦な応答を持ちます。

けれども、他の場合で、NGはAvよりも速く増加するかもしれず、これはより高い利得でSNRの減少を意味します。

2. 単一演算増幅器構成

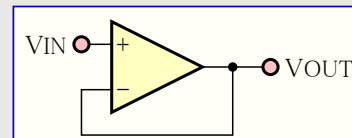
2.1. 利得1/電圧フォロワ

演算増幅器の最も簡単な構成の1つが時々電圧フォロワとしても知られる利得1です。利得1演算増幅器は非反転入力に印加された信号に等しい出力を持ちます。反転入力は演算増幅器の出力に直接接続されます。この接続はA/D変換器(ADC)での直接採取と異なり、全尺、高インピーダンス信号に対して理想的です。

この回路の出力は次式を使って計算することができます。

$$V_{OUT} = V_{IN}$$

図2-1. 利得1回路図



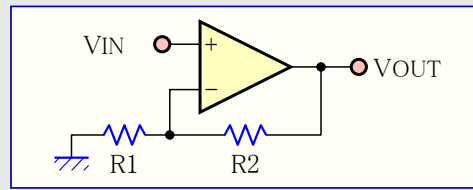
2.2. 非反転増幅器

別の非常に一般的な構成が非反転増幅器です。非反転増幅器は入力信号よりも大きな出力を持ちます。非反転増幅器の回路図が右で示されます。

この回路の出力は次式を使って計算することができます。

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{IN}$$

図2-2. 非反転増幅器回路図



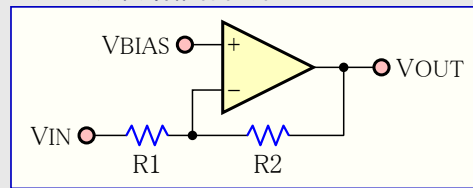
2.3. 反転増幅器

反転増幅器は出力を反転して尺度調整する演算増幅器の構成です。けれども、この構成で使われる帰還抵抗のため、入力信号のインピーダンスはこの回路の利得に影響を及ぼし、これは出力の式でR2に信号インピーダンスを加えるように見ることができます。加えて、組み込み演算増幅器が単電源のため、演算増幅器の非反転入力には信号を演算増幅器の出力範囲内に留めるのを保証するためにバイアスされなければなりません。

この回路の出力は次式を使って計算することができます。

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{BIAS} - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{IN}$$

図2-3. 反転増幅器回路図



警告 決してデバイスの絶対最大定格を超える入力信号を印加してはなりません。絶対最大定格を超えるまたは下回る出力が予測される出力信号は出力範囲の最大または最小の値に自己制限します。

2.4. シュミットトリガ

シュミットトリガは入力が区域を抜け出すまで出力が同じ状態に留まる沈黙区間のヒステリシスを持つアナログ比較器です。シュミットトリガの出力関数が右図で示されます。

他の構成と異なり、帰還網が非反転入力に接続されます。これは正帰還を増して出力をVDDまたはGNDのどちらかにラッチするのを助けます。

シュミットトリガの切替点はバイアス電圧と帰還抵抗の組み合わせによって設定されます。出力が0Vの場合の状態では帰還抵抗が分圧器として働きます。分割した信号がバイアス電圧よりも大きい時に出力が反転します。

$$V_{LOW_SW} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} \times V_{BIAS}$$

出力がVDDの場合、帰還抵抗は(反転した抵抗器での)分圧器としても働きます。

$$V_{HIGH_SW} = V_{DD} - \left(\left(\frac{R_2 + R_1}{R_2}\right) \times V_{BIAS}\right)$$

これら2つの式からヒステリシスの量を次のように計算することができます。

$$V_{HY} = \left| V_{DD} - (R_1 + R_2) \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \times V_{BIAS} \right|$$

マイクロコントローラが統合された梯子型抵抗を含むなら、上式に絶対値を代入するよりもむしろ、抵抗の単位を相殺するため、固定(または任意)の値に相対する抵抗の値(例えば、R1=4RとR2=6R、ここでRは未知また任意の数値)を代入することができます。

図2-4. シュミットトリガ - 出力関数例

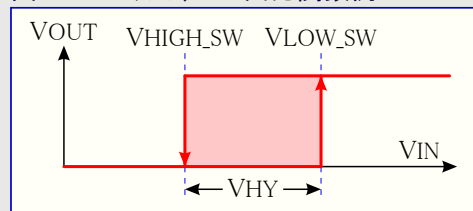
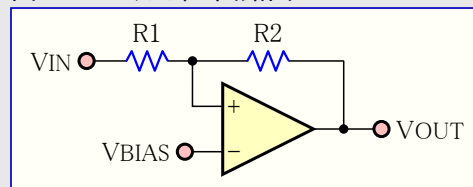


図2-5. シュミットトリガ回路図

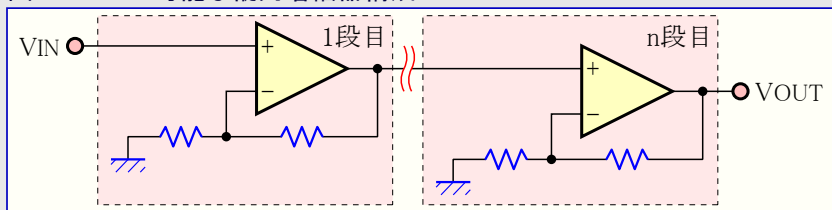


3. 複数演算増幅器構成

3.1. 縦列増幅器

縦列増幅器は直列で2つ以上のより小さな構成から成る演算増幅器の構成です。縦列増幅器の例は初段の出力が次の入力である2つの非反転増幅器で有り得ます。この筋書きでは回路の利得が各段での利得の積に等しくなります。例えば、各段が各々9と5の利得を持つ2段縦列増幅器での総利得は45に相当します。図3-1はこの形式の構成の例を示します。

図3-1. 1つの可能な縦列増幅器構成



3.2. 差動増幅器

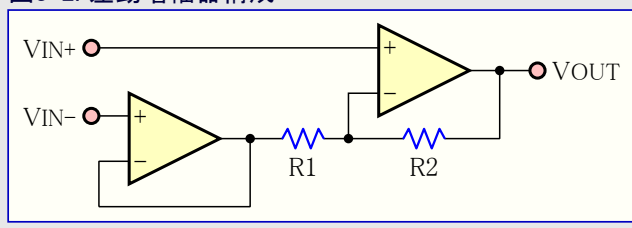
差動増幅器は入力信号間の差だけを得るために2つの入力信号を取ってそれらを減算するように設計されています。差動増幅器はそれに関連しますが、**計装増幅器**とは異なります。図3-2は差動増幅器実装を示します。

計装増幅器と比べて最も重要な違いの1つは差動増幅器が出力にバイアス電圧を加えることです。これは入力反転する場合に出力が有効に留まり得ることで有益です。けれども、各入力の利得が一致せず、同時に両入力を充電する場合に予期せぬ出力を引き起こすかもしれません。

最も予測可能にするには、入力の1つを既知の定数に固定するか、または他方を解く前に入力の1つを測定するかのどちらかです。出力の式が下で示されます。

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times (VIN+) - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \times (VIN-)$$

図3-2. 差動増幅器構成



3.3. 計装増幅器

差動増幅器のように、計装増幅器は2つの入力信号間の差を増幅するように設計されています。計装増幅器は3つの演算増幅器を使う一方で、差動増幅器は2つだけを使います。マイクロコントローラで実装される構造が下の図3-3で示されます。

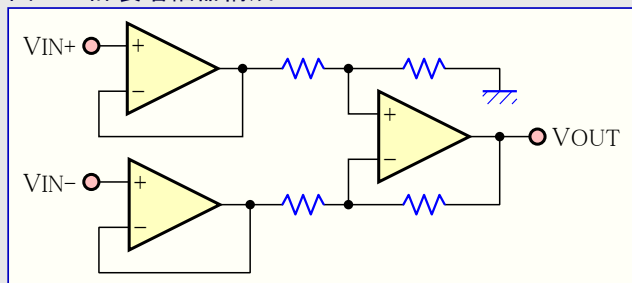
注: 個別部品計装増幅器はマイクロコントローラでのものと異なる回路実装を使うかもしれません。

差動増幅器と異なり、計装増幅器入力には両入力と同時に変わる時の差電圧計算を容易にする一致した利得を持ちます。けれども、計装増幅器構成は一方方向性で、入力が反転した場合、出力は接地になります(より多くの情報については「5.4. 出力振れ幅」をご覧ください)。出力の式が下で示されます。

$$V_{OUT} = (VIN+ - VIN-) \times \text{利得}$$

この回路の可能な利得構成はデバイスのデータシートを調べてください。

図3-3. 計装増幅器構成



4. 一般的な実装情報

4.1. 抵抗選択

抵抗器は殆ど演算増幅器回路に対する帰還網の一部として使われます。殆どの場合、帰還網の抵抗は回路の動きを決める重要な要素です。このため、抵抗器の許容誤差は回路の意図する動きに於いて誤差を引き起こし得ます。各抵抗器は指定した精度許容誤差を持ち、より高価な抵抗器がより良い許容誤差です。けれども、殆どの場合、抵抗器の絶対精度は重要ではなく、回路内の他の抵抗器に関する比例的精度だけが回路の精度を決めます。

内部梯子型抵抗を持つデバイスでは、抵抗網の絶対精度が厳しく制御されませんが、梯子型での比例的精度は両抵抗が同じウェハ内の同じダイで製造されるため、より安定です。内部梯子型抵抗は面積に制約がある応用と利得精度が殆ど制限されない(または校正可能な)応用での使用に推奨されます。梯子型抵抗の利得は梯子型の誤差のいくつかを校正するためのMicrochipの応用記述AN3633「**アナログ信号調整(OPAMP)周辺機能の利得と変位の校正**」(DS00003633A)で検討される方法を使って測定することができます。

4.1.1. 温度変動

抵抗器誤差の別の原因は温度変動で、1つの抵抗器の温度変動は別のものと異なり、誤差は温度が校正点から変わる時に増します。この影響を避けるため、特に温度が変わる応用では抵抗器が同じ温度変動係数を持ち、温度の違いを避けるためにお互いに可能な限り近くに配置されなければなりません。

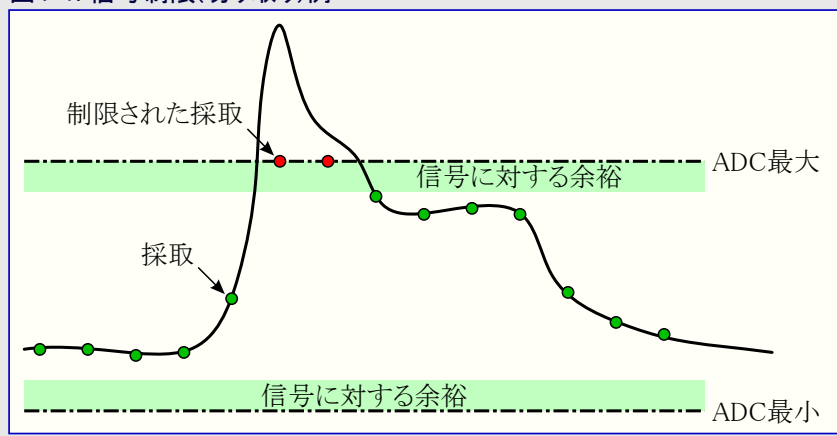
温度変動を扱う別の方法は抵抗網(または集合抵抗)を使うことです。これらの抵抗器は同じ外囲器で組み立てられ、温度に於いて厳密に一致した回路網を保ちます。同様に、内部梯子型抵抗はマイクロコントローラのダイで構築され、温度と温度係数に関してしっかりと一致した回路網を保ちます。

4.2. 信号余裕とA/D変換器

A/D変換器はアナログ信号を測定して入力に比例するデジタル値を生成します。ADCの入力信号範囲を最大化するため、大きな電圧参照基準を使うことができますが、これは信号分解能の犠牲を払ってです。

これに対する1つの解決策はADCからのより多くの分機能のために入力信号を動的に尺度調整するように演算増幅器を使うことです。けれども、信号利得への演算増幅器使用時、信号連鎖でのどの誤差も考慮するため、少量の余裕を残すことが重要です。演算増幅器の出力が測定範囲を超える場合、デジタル値はADCで可能な最大値に制限されます。これはMicrochipの応用記述AN4225「**信号最大化: 正しいアナログ信号採取のための助言と裏技**」(DS00004225A)でもっと詳細に記述されます。

図4-1. 信号制限(切り取り)例



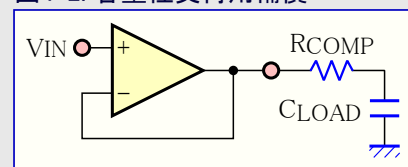
4.3. 容量性負荷と安定性

演算増幅器使用時に覚えて置く鍵となる要素の1つが出力での負荷です。重い抵抗性負荷に対して出力振れ幅が減るかもしれませんが、増幅器は安定に留まります。けれども、重い容量性負荷は入力に関して出力の位相変移を齎します(抵抗性動作条件でも僅かな位相変移が有り得ることに注意してください)。この位相変移が出力に度を越す位相外れを引き起こす場合、演算増幅器は発振を始めます。

注: この位相変移要素は位相余裕に関連し、これはMicrochipの応用記述AN723「演算増幅器のAC仕様と応用」(DS00723A)でもっと詳細に検討されます。

位相変移を安定化する最も簡単な方法は右図で示されるように出力と容量性負荷の間に抵抗を置くことです。抵抗の正確な値は負荷容量と、最大出力電流とスlewレートのような演算増幅器の特定特性に大きく依存します。

図4-2. 容量性負荷用補償



4.4. 混合した信号入出力での影響

アナログ入力と混合したマイクロコントローラの信号入出力の使用時、入出力パッドによって生成された寄生効果があります。考慮する最も大きな2つの寄生物は入力容量と静電放電(ESD:Electro-Static Discharge)ダイオード漏れです。ESDダイオードを通る漏れは入力バイアス電流ではなく、これは演算増幅器に入るまたは出る電流ですが、大まかな視点からはこの影響は同じです。いくつかの場合で、ESDダイオードを通る漏れは入力バイアス電流からの漏れを超えるかもしれません。より高い動作温度はより低い温度に比べてかなりのより高い漏れ電流を引き起こすでしょう。

5. 性能特性

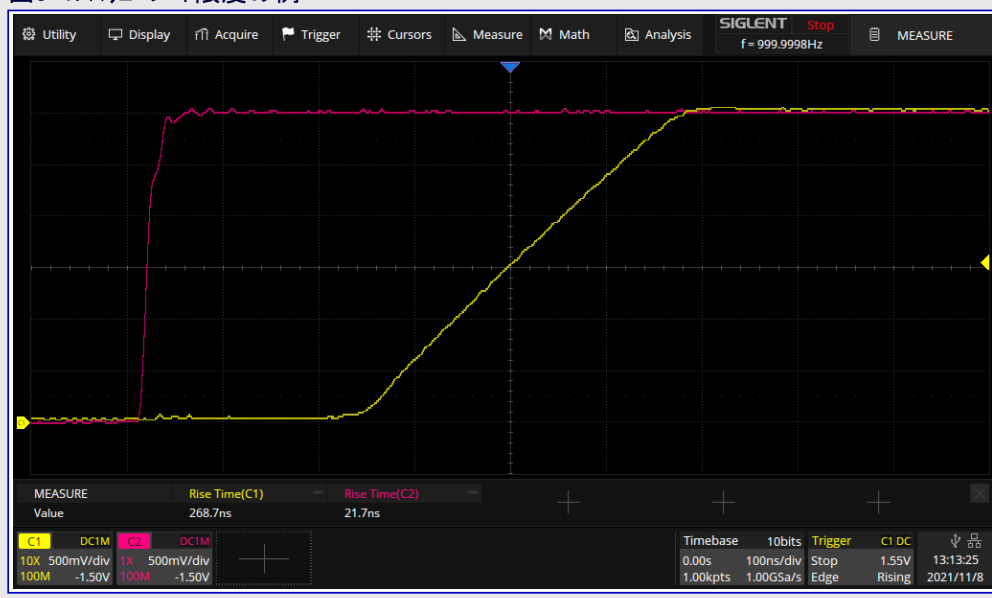
演算増幅器は全ての電子部品のように理想と異なる有限の性能特性を持ちます。この文書のこの章は最も一般的な性能特性とそれらが設計にどう影響し得るかを掘り下げて調査します。

5.1. スlewレート

演算増幅器のスlewレートは出力信号がどの位速く上昇/下降できるかを決めます。理想方形波入力で波形の出力端は垂直に近くあるべきですが、実際の波形は図5-1.で示されるように傾斜端を持ちます。

スlewレートの別の結果は高振幅信号での帯域での減少です。これは入力信号派生物を計算することによって示すことができます。スlewレートを超える変化速度の場合、例え信号が利用可能な帯域内でも、デバイスの最大スlewレートに制限されます。

図5-1. スlewレート限度の例



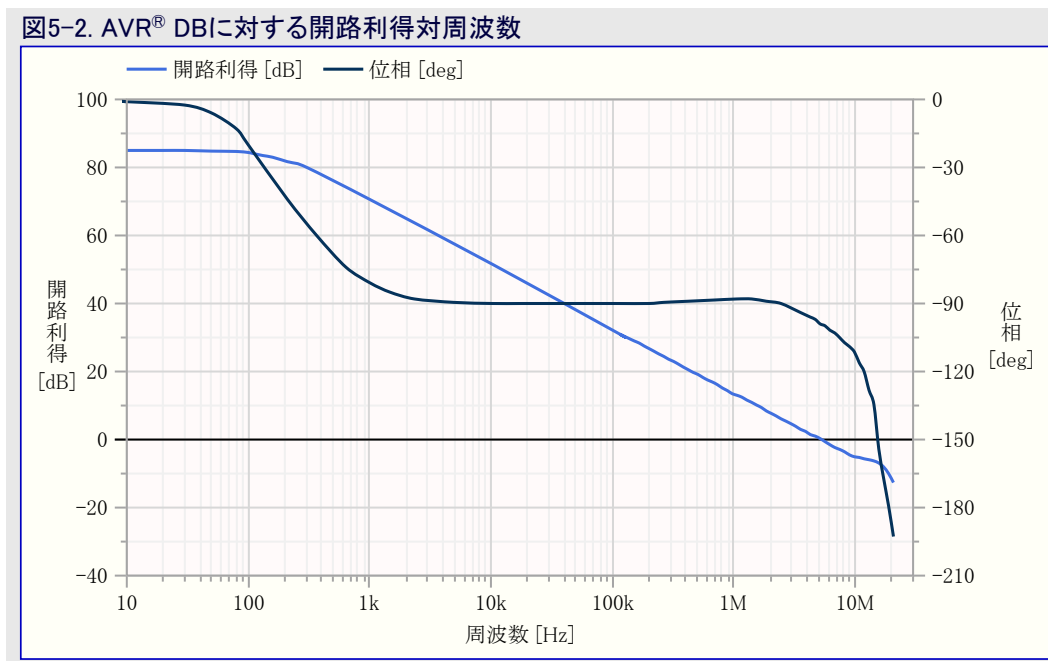
5.2. 開路利得

「1. 演算増幅器の基礎」の前の方から思い出してください。演算増幅器はそれの入力間の電圧での違いを無くそうとするように設計されています。開路利得は負と正の帰還なしで、入力差電圧での小さな変化のための出力電圧での変化です。

注: 安定性と性能のため、演算増幅器は常にいくつかの帰還形式で使われなければなりません。

5.3. 利得帯域幅積 (GBWP)

GBWPは与えられた回路帯域で可能な利得の最大量の推定です。DCでの開始値は開路利得です。低い周波数については利得が相対的に安定に留まりますが、利得が10倍毎に-20dB低下し始める臨界周波数まで開路利得に等しい必要はありません。GBWPは演算増幅器の利得が0dB(利得1)に達する点です。図5-2は5MHzのGBWPを持つAVR[®] DBマイクロコントローラの演算増幅器に対して周波数によって作図された開路利得を示します。



GBWPは与えられた帯域で演算増幅器の最大利得を推測するのに使うことができます。演算増幅器が5MHzのGBWPを持つ場合、利得5での最大帯域は1MHzです。

注: 許容誤差と非理想的な特性のための余裕を残すことが強く推奨されます。

5.4. 出力振れ幅

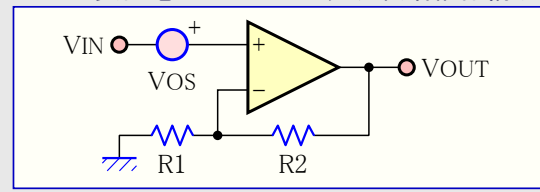
演算増幅器の出力振れ幅は出力が与えられた出力負荷でどれ位電力と接地の母線に近づくかを指示します。いくつかの演算増幅器は標準的な演算増幅器と比べて出力が電源に非常に近づくことができることを示す「Rail-to-Rail(電源幅一杯)」として参照されます。演算増幅器の出力でのより重い負荷は出力振れ幅範囲を減らします。

5.5. 電圧変位

前で述べたように、演算増幅器の目的はそれの入力間の差を0にすることです。けれども、演算増幅器の非理想的特性のため、図5-3.で示されるように現実的に非反転入力と直列に追加される僅かな電圧変位(オフセット)があります。

多くの場合で、この小さな入力変位電圧は無視できるほどか、または校正することができます。けれども、演算増幅器の利得は出力の望まれない成分として入力変位を拡大します。入力変位電圧によって見られるような利得は雑音利得(NG:Noise Gain)として参照され、より多くの情報については「1.2. 信号利得と雑音利得」をご覧ください。

図5-3. 変位電圧が示された非反転増幅器構成

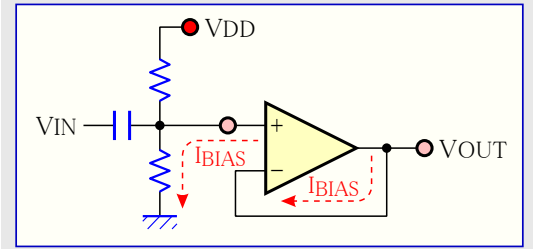


5.6. 入力バイアス電流

理想演算増幅器では演算増幅器の入力で電流が流れません。けれども、内部漏れ電流のため、少量の電流が入力(または入力の外)に流れます。この電流はnAから μ Aの範囲で、温度が上がると電流がかなり増すと予想します。

この電流が流れる経路が常にあることが重要です。入力がAC結合される、または信号源がマイクロコントローラの接地を参照しない場合、この電荷が蓄積して誤った動きを引き起こし得ます。この電流を迂回させる方法が右の図5-4.で示されます。

図5-4. 可能なバイアス電流用戻り経路



5.7. 同相入力電圧

演算増幅器の別の制限は同相入力電圧です。この範囲は演算増幅器の両入力に共通する電圧として定義されます。同相電圧が指定された限度外の場合、演算増幅器は機能不全、電氣的仕様外実行、または障害になるかもしれません。

5.8. 雑音

雑音は考慮すべき最も複雑な話題の1つです。演算増幅器での固有の雑音から入出力変化からの切り替え雑音まで多くの有り得る雑音源があります。本項は最も一般的な雑音源のいくつかを網羅します。

5.8.1. 漏話

漏話は演算増幅器の入力と出力を結合する高速な上昇または下降の信号によって引き起こされます。度々、漏話はアナログ信号近くのデジタル信号から起こります。高入力インピーダンスを持つアナログ入力はこの形式の妨害に最も脆弱です。

漏話を最小化するには、デジタル信号を可能な限りアナログ入出力から離してください。発振器やクロックからのそれらのような高い雑音信号に対しては、それらが可能な限り短く保たれなければなりません。マイクロコントローラからの雑音を最小化するには、敏感な動作が進行中の時に入出力が切り替えられず、デバイスが休止でなければなりません。漏話を減らす別の方法は切り替え時に生成される高周波数成分を減らす入出力のスlewレートを減らすことです。

A/D変換器(ADC)使用時の雑音低減についてより多くの情報に関してはMicrochipの応用記述AN4225「信号最大化: 正しいアナログ信号採取のための助言と裏技」(DS00004225A)を調べてください。

5.8.2. 電圧雑音

電圧雑音は右で示されるように非反転入力信号と直列の増幅器によって内部的に加えられる雑音量の評価です。

この雑音源は2つの周波数範囲、低周波数範囲と高周波数範囲で特性付けされます。入力換算雑音電圧は低周波数範囲(一般的に0.1~10Hz)内で雑音電圧と等価です。この範囲外の雑音は回路の帯域と入力換算雑音電圧密度を使って計算することができます。

例えば、利得1演算増幅器が100 μ V(p-p)の入力換算雑音電圧、100nV/rt(Hz)の入力換算雑音電圧密度、1MHzの回路帯域を持つ場合、演算増幅器からの雑音は次のように近似(p-p)することができます。

$$V_{\text{NOISE}} = 100\mu\text{V} + 6.6 \times 100 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{1\text{MHz} - 10\text{Hz}} = 760\mu\text{V}$$

注: 1. 非利得1回路については計算された値を取り、回路の雑音利得で乗算してください。

2. 入力換算雑音電圧密度は通常、頂点間(p-p)ではなく、実効値(RMS:Root Mean Square, 二乗平均平方根)で指定されます。

3. 回路帯域をGBWPと混同してはなりません。回路帯域は具体的に回路内で演算増幅器が持つ最大帯域のことです。

雑音の量を減らす1つの方法は演算増幅器の帯域をより下げることです。これは複数の方法で行うことができます。1つ目の方法は演算増幅器の出力に低域通過濾波器を置くことです。この方法は出力インピーダンスを増し、濾波器に使われるRとCに依存して安定性の問題を引き起こすかもしれません。右図はこの実装を示します。

図5-5. 電圧変位と雑音を示された利得1演算増幅器

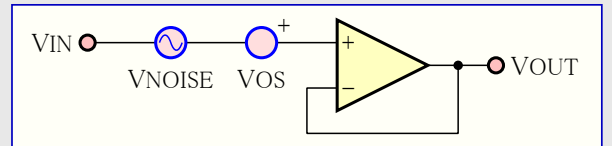
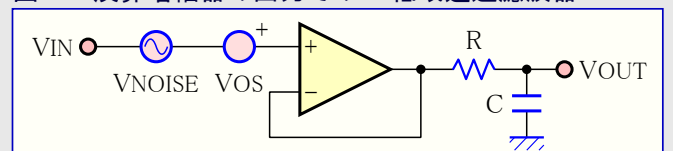
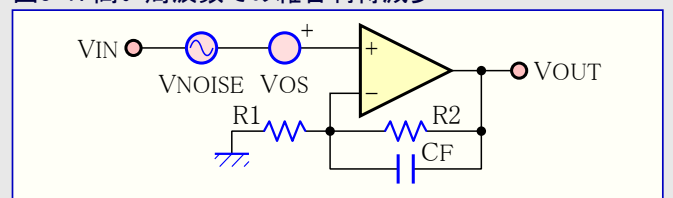


図5-6. 演算増幅器の出力でのRC低域通過濾波器



2つ目の方法は演算増幅器の帰還に渡ってコンデンサを追加することです。これは右図で示されるように、高い周波数で帰還抵抗のインピーダンスを低下させ、従ってより高い周波数で利得量を減らします。

図5-7. 高い周波数での雑音利得減少



5.8.3. デジタル的雑音除去

演算増幅器がA/D変換器(ADC)で使われている場合、データのデジタル平均は採取に存在する雑音量を除去または減少することができます。全てのマイクロコントローラはソフトウェアでこの動作を実行することができますが、いくつかのマイクロコントローラはCPU使用減少のためにハードウェアでこの操作を実行することができる高度なADC周辺機能が特徴です。この雑音低減の方法はMicrochipの応用記述AN4225「信号最大化: 正しいアナログ信号採取のための助言と裏技」(DS00004225A)で更に検討されます。

6. 高度な演算増幅器応用

6.1. 電圧制御電流源

電圧制御電流源は電流が入力電圧によって設定される負荷を通して通過する回路の形式です。この回路形式は特に(指数的な電流電圧関係を持つ)LEDのような非直線負荷に有用です。回路例が右で示されます。

この回路に於いて、出力から反転入力へのLEDは定電流負荷として働きます。反転入力から接地への抵抗は次のこの式に従って回路の電流応答を設定します。

$$I_{LOAD} = \frac{V_{IN+}}{R}$$

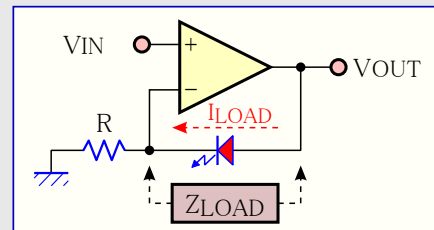
理想出力応答はいくつかの注意事項を伴います。これは反転入力での電圧が非反転入力での電圧(VIN+)と等しいと仮定し、これは演算増幅器の最大出力-負荷を渡る電圧低下がVIN+に等しい場合にだけ真です。この条件が合わない場合、出力は以下のように制限された電流になります。

$$I_{MAX} = \frac{V_{OH} - V_{LOAD}}{R}$$

ここで、VOHは演算増幅器の最大出力電圧、VLOADはIMAXで負荷を渡る低下です。

この例はMicrochipの応用記述AN3632「アナログ信号調整(OPAMP)周辺機能を使う定電流駆動部」(DS00003632A)で示されます。

図6-1. 電圧制御電流源回路図



7. 更なる情報

統合された演算増幅器についてのより多くの情報に関してはMicrochipウェブサイト(www.microchip.com)で入手可能な以下の文書を参照してください。

- AN682 - 組み込み系での単電源演算増幅器の使い方 (DS00682D)
- AN723 - 演算増幅器のAC仕様と応用 (DS00723A)
- AN1747 - 8ビットPIC®マイクロコントローラを使う演算増幅器応用 (DS00001747A)
- AN3521 - アナログ感知器の測定と採取 (DS00003521A)
- AN3633 - アナログ信号調整(OPAMP)周辺機能の利得と変位の校正 (DS00003633A)
- AN4225 - 信号最大化: 正しいアナログ信号採取のための助言と裏技 (DS00004225A)
- TB3279 - 内部演算増幅器のアナログ信号調整用最適化 (DS90003279A)
- TB3280 - PIC16とPIC18での演算増幅器の使い方 (DS90003280A)

8. 改訂履歴

文書改訂	日付	注釈
A	2022年2月	初版文書公開

Microchipウェブ サイト

Microchipはwww.microchip.com/で当社のウェブ サイト経由でのオンライン支援を提供します。このウェブ サイトはお客様がファイルや情報を容易に利用可能にするのに使われます。利用可能な情報のいくつかは以下を含みます。

- **製品支援** – データシートと障害情報、応用記述と試供プログラム、設計資源、使用者の手引きとハードウェア支援資料、最新ソフトウェア配布と保管されたソフトウェア
- **一般的な技術支援** – 良くある質問(FAQ)、技術支援要求、オンライン検討グループ、Microchip設計協力課程会員一覧
- **Microchipの事業** – 製品選択器と注文の手引き、最新Microchip報道発表、セミナーとイベントの一覧、Microchip営業所の一覧、代理店と代表する工場

製品変更通知サービス

Microchipの製品変更通知サービスはMicrochip製品を最新に保つのに役立ちます。加入者は指定した製品系統や興味のある開発ツールに関連する変更、更新、改訂、障害情報がある場合に必ず電子メール通知を受け取ります。

登録するにはwww.microchip.com/pcnへ行って登録指示に従ってください。

お客様支援

Microchip製品の使用者は以下のいくつかのチャネルを通して支援を受け取ることができます。

- 代理店または販売会社
- 最寄りの営業所
- 組み込み解決技術者(ESE:Embedded Solutions Engineer)
- 技術支援

お客様は支援に関してこれらの代理店、販売会社、またはESEに連絡を取るべきです。最寄りの営業所もお客様の手助けに利用できます。営業所と位置の一覧はこの資料の後ろに含まれます。

技術支援はwww.microchip.com/supportでのウェブ サイトを通して利用できます。

Microchipデバイス コード保護機能

Microchip製品での以下のコード保護機能の詳細に注意してください。

- Microchip製品はそれら特定のMicrochipデータシートに含まれる仕様に合致します。
- Microchipは動作仕様内で意図した方法と通常条件下で使われる時に、その製品系統が安全であると考えます。
- Microchipはその知的所有権を尊重し、積極的に保護します。Microchip製品のコード保護機能を侵害する試みは固く禁じられ、デジタル ミレニアム著作権法に違反するかもしれません。
- Microchipや他のどの半導体製造業者もそのコードの安全を保証することはできません。コード保護は製品が”破ることができない”ことを当社が保証すると言うことを意味しません。コード保護は常に進化しています。Microchipは当社製品のコード保護機能を継続的に改善することを約束します。

法的通知

この刊行物と契約での情報は設計、試験、応用とのMicrochip製品の統合を含め、Microchip製品でだけ使えます。他の何れの方法でのこの情報の使用はこれらの条件に違反します。デバイス応用などに関する情報は皆さまの便宜のためにだけ提供され、更新によって取り換えられるかもしれません。皆さまの応用が皆さまの仕様に合致するのを保証するのは皆さまの責任です。追加支援については最寄りのMicrochip営業所にお問い合わせ頂くか、www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-servicesで追加支援を得てください。

この情報はMicrochipによって「現状そのまま」で提供されます。Microchipは非侵害、商品性、特定目的に対する適合性の何れの黙示的保証やその条件、品質、性能に関する保証を含め、明示的にも黙示的にもその情報に関連して書面または表記された書面または黙示の如何なる表明や保証もしません。

如何なる場合においても、Microchipは情報またはその使用に関連するあらゆる種類の間接的、特別的、懲罰的、偶発的または結果的な損失、損害、費用または経費に対して責任を負わないものとします。法律で認められている最大限の範囲で、情報またはその使用に関連する全ての請求に対するMicrochipの全責任は、もしあれば、情報のためにMicrochipへ直接支払った料金を超えないものとします。生命維持や安全応用でのMicrochipデバイスの使用は完全に購入者の危険性で、購入者はそのような使用に起因する全ての損害、請求、訴訟、費用からMicrochipを擁護し、補償し、免責にすることに同意します。他に言及されない限り、Microchipのどの知的財産権下でも暗黙的または違う方法で許認可は譲渡されません。

商標

Microchipの名称とロゴ、Microchipロゴ、Adaptec、AnyRate、AVR、AVRロゴ、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemiロゴ、MOST、MOSTロゴ、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32ロゴ、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SSTロゴ、Super Flash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron、XMEGAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、Hyper Light Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plusロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime、WinPath、ZLは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certifiedロゴ、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、NVM Express、NVMe、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect、and ZENAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの商標です。

SQTPは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの役務標章です。

Adaptecロゴ、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcom、Trusted Timeは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の登録商標です。

GestICは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の子会社であるMicrochip Technology Germany II GmbH & Co. KGの登録商標です。

ここで言及した以外の全ての商標はそれら各々の会社の所有物です。

© 2022年、Microchip Technology Incorporatedとその子会社、不許複製

品質管理システム

Microchipの品質管理システムに関する情報についてはwww.microchip.com/qualityを訪ねてください。

日本語© HERO 2022.

本応用記述はMicrochipのAN3110応用記述(DS00003110A-2022年2月)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には()内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。

世界的な販売とサービス

米国	亜細亜/太平洋	亜細亜/太平洋	欧州
本社 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277 技術支援: www.microchip.com/support ウェブアドレス: www.microchip.com アトランタ Duluth, GA Tel: 678-957-9614 Fax: 678-957-1455 オースチン TX Tel: 512-257-3370 ボストン Westborough, MA Tel: 774-760-0087 Fax: 774-760-0088 シカゴ Itasca, IL Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075 ダラス Addison, TX Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924 デトロイト Novi, MI Tel: 248-848-4000 ヒューストン TX Tel: 281-894-5983 インディアナポリス Noblesville, IN Tel: 317-773-8323 Fax: 317-773-5453 Tel: 317-536-2380 ロサンゼルス Mission Viejo, CA Tel: 949-462-9523 Fax: 949-462-9608 Tel: 951-273-7800 ローリー NC Tel: 919-844-7510 ニューヨーク NY Tel: 631-435-6000 サンホセ CA Tel: 408-735-9110 Tel: 408-436-4270 カナダ - トロント Tel: 905-695-1980 Fax: 905-695-2078	オーストラリア - シドニー Tel: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 Tel: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 Tel: 86-28-8665-5511 中国 - 重慶 Tel: 86-23-8980-9588 中国 - 東莞 Tel: 86-769-8702-9880 中国 - 広州 Tel: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 Tel: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特別行政区 Tel: 852-2943-5100 中国 - 南京 Tel: 86-25-8473-2460 中国 - 青島 Tel: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 Tel: 86-21-3326-8000 中国 - 瀋陽 Tel: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 Tel: 86-755-8864-2200 中国 - 蘇州 Tel: 86-186-6233-1526 中国 - 武漢 Tel: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 Tel: 86-29-8833-7252 中国 - 廈門 Tel: 86-592-2388138 中国 - 珠海 Tel: 86-756-3210040	インド - ハンガロール Tel: 91-80-3090-4444 インド - ニューデリー Tel: 91-11-4160-8631 インド - フネー Tel: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 Tel: 81-6-6152-7160 日本 - 東京 Tel: 81-3-6880-3770 韓国 - 大邱 Tel: 82-53-744-4301 韓国 - ソウル Tel: 82-2-554-7200 マレーシア - クアラルンプール Tel: 60-3-7651-7906 マレーシア - ペナン Tel: 60-4-227-8870 フィリピン - マニラ Tel: 63-2-634-9065 シンガポール Tel: 65-6334-8870 台湾 - 新竹 Tel: 886-3-577-8366 台湾 - 高雄 Tel: 886-7-213-7830 台湾 - 台北 Tel: 886-2-2508-8600 タイ - バンコク Tel: 66-2-694-1351 ベトナム - ホーチミン Tel: 84-28-5448-2100	オーストラリア - ウェルズ Tel: 43-7242-2244-39 Fax: 43-7242-2244-393 デンマーク - コペンハーゲン Tel: 45-4485-5910 Fax: 45-4485-2829 フィンランド - エスポー Tel: 358-9-4520-820 フランス - パリ Tel: 33-1-69-53-63-20 Fax: 33-1-69-30-90-79 ドイツ - ガルヒング Tel: 49-8931-9700 ドイツ - ハーン Tel: 49-2129-3766400 ドイツ - ハイムブロン Tel: 49-7131-72400 ドイツ - カールスルーエ Tel: 49-721-625370 ドイツ - ミュンヘン Tel: 49-89-627-144-0 Fax: 49-89-627-144-44 ドイツ - ローゼンハイム Tel: 49-8031-354-560 イスラエル - ラーナナ Tel: 972-9-744-7705 イタリア - ミラノ Tel: 39-0331-742611 Fax: 39-0331-466781 イタリア - パドバ Tel: 39-049-7625286 オランダ - デルフト Tel: 31-416-690399 Fax: 31-416-690340 ノルウェー - トロンハイム Tel: 47-72884388 ポーランド - ワルシャワ Tel: 48-22-3325737 ルーマニア - ブカレスト Tel: 40-21-407-87-50 スペイン - マドリッド Tel: 34-91-708-08-90 Fax: 34-91-708-08-91 スウェーデン - イェテボリ Tel: 46-31-704-60-40 スウェーデン - ストックホルム Tel: 46-8-5090-4654 イギリス - ウォーキングム Tel: 44-118-921-5800 Fax: 44-118-921-5820