AN202478

PSoC® 4 - 静電容量型液面レベル センシング

著者: Greg Verge

関連製品ファミリ: CY8C42xx

関連サンプル コード: CE202479

関連アプリケーション ノート: AN85951

本アプリケーション ノートの最新版または関連プロジェクト ファイルについては、http://www.cypress.com/AN202478 をご覧ください。

本アプリケーション ノート (AN202478) は、非導電性容器における水性の液体の深さまたは有無を測定するための PSoC 4 デバイス、CapSense®技術および静電容量センサーの使用法について説明します。容器外面の上または近くに配置するセンサーは、液体に触れずに液体の高さや残量率をリアルタイムに報告します。低コストな素材を使用しながら高精度の測定結果を提供する幾つかのオプションが用意されています。

目次

1 はじめに 1
1.1 初心者用リソース 2
2 システムの説明 2
2.1 ブロック図 2
2.2 ハードウェア要件 3
3 システム理論 4
3.1 CapSense の基本知識 4
3.2 環境の影響 4
3.3 CapSense コンポーネントの設定 5
3.4 センサー パターンの選択 7
3.5 セグメント化センサー 8
3.6 差動センサー 11
4 センサー レイアウト 14
4.1 一般的なレイアウトの注意事項 14
4.2 セグメント化センサー パターンの注意事項 15
4.3 差動センサー パターンの注意事項 15
5 要約 15
改訂履歴 16
ワールドワイドな販売と設計サポート 17
製品 17
PSoC®ソリューション 17
サイプレス開発者コミュニティ 17
テクニカル サポート 17

1 はじめに

液面レベル センシング (LLS) は物理的に接触することなく、容器にある液体の有無とレベルを検出します。静電容量、メカニカル フロート、誘導性、磁気、ホール効果、光、音響インピーダンス密度、超音波などの様々な液面レベル センサーの種類があります。それぞれ独自の利点と欠点を持っています。静電容量型液面レベル センシングは、低コスト、高信頼性、低消費電力、洗練された美しさ、および既存の制御アーキテクチャとのシームレスな統合性により普及しています。

サイプレスの PSoC 4 デバイスは 1mm までの分解能で液面レベル センシングをサポートします。静電容量型液面レベル センシングは無償の PSoC Creator™ IDE で利用可能な CapSense_CSD コンポーネントを使用することで提供されます。CapSense_CSD コンポーネントは、内蔵 CapSense ペリフェラル ハードウェアを構成し、PSoC 4 デバイスの動作に必要なファームウェアを提供します。CapSense の使用により得られる、液面レベル センシングの重要な利点は以下の通りです:

- 非接触測定のため、汚染や洗浄の問題を無くします。
- センサーは非導電性液体容器の外部に配置するため、産業機器の設計を簡略化し、製品に対するユーザー エクスペリエンスを向上させます。
- 分解能と精度の最適化により、単一、低コストのベース システムの価格帯を調整することが可能になります。
- センサーはプラスチック基板や導電性インクなどの低コストの素材から構成することができます。

本アプリケーション ノートはハードウェア、ファームウェア、回路図および BOM の設計について詳しく説明します。本アプリケーション ノートの概念を表すサンプル プロジェクトについてはサンプル コード「CE202479」を参照ください。そのサンプル コードは「CY8CKIT-042 PSoC 4 Pioneer Kit」と「CY8CKIT-022 Liquid Level Sensing Shield」の組み合わせを使用します。

本アプリケーション ノートはサイプレスの CapSense 技術を取り扱う上級者向けのものです。CapSense 技術の初心者の方は「Getting Started with CapSense」設計ガイドを参照ください。PSoC 4 デバイス上の CapSense 技術の実装方法については「PSoC 4 CapSense Design Guide」を参照ください。

本アプリケーション ノートは CapSense を使用する従来の指タッチ アプリケーションと異なる部分に焦点を当てます。最終的に 2 つの設計が同じになることはない、そして提供された設計ルールは特に記述がない限り物理的制限が無いことを念頭に置くことが重要です。推奨された限界に近いまたはそれを超える 1 つ以上の設計パラメーターを使用する場合、低下したとしても許容できる性能で動作することができます。ただし、それと同じ性能は他のアプリケーションに不適切であることがあります。提供された設計の推奨事項をガイダンスとして使用し、実際の設計条件下で検証を行ってください。

1.1 初心者用リソース

PSoC デバイスの概要は www.cypress.com/psoc に掲載されています。ウェブページ上に掲載されるのは、PSoC デバイス ファミリー覧、統合開発環境 (IDE) および関連した開発キットです。また、PSoC 4 デバイスおよび CapSense 技術から始める場合、以下の資料を参照ください。

- AN79953 – Getting Started with PSoC® 4
- Getting Started with CapSense®
- PSoC® 4 CapSense® Design Guide
- CE202479 – Code Example for liquid-level sensing
- PSoC 101 Training series

2 システムの説明

静電容量型液面レベル センシング システムは次の 2 つの重要な設計要素から構成されます:

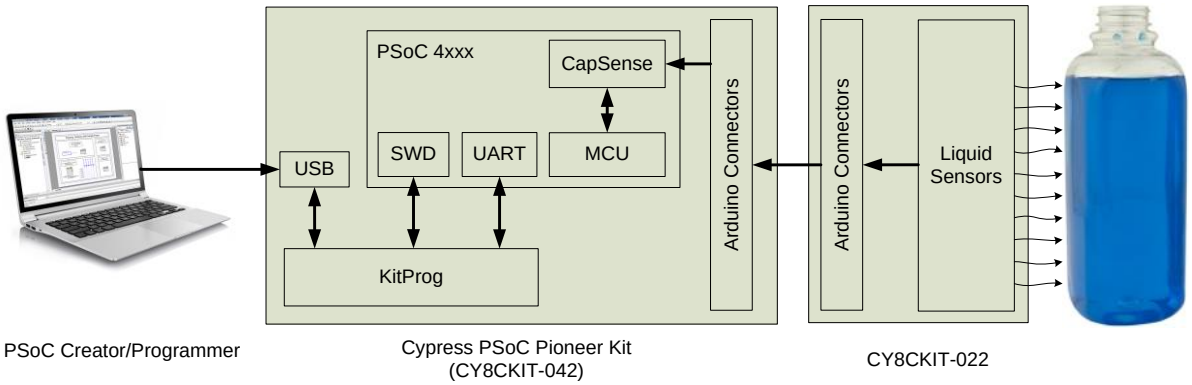
1. 液面レベルを感知するための静電容量センサー パターン
2. センサーを測定し、液面レベルを計算するための CapSense コンポーネント付きの PSoC 4 デバイス

本節では、大きなシステムに統合する方法について高次レベルの概要を提供します。両方の設計要素は 3 節に詳しく説明されます。

2.1 ブロック図

図 1 は、CY8CKIT-022 液面レベル センシング シールド キットのブロック図であり、PSoC 4 ベースの液面レベル センシング設計の簡素さを示しています。殆どの設計は 1 つの PSoC 4 デバイスと 1 つの CapSense 液体センサーのみを必要とします。システム コストをさらに削減するために他のシステム機能を PSoC 4 デバイスに統合することが可能です。

図 1. 液面レベル センシングのブロック図



2.2 ハードウェア要件

CapSense 液面レベル センシング ハードウェアを実装するには、PSoC 4 デバイスと液体容器に取り付ける液面レベル センサーが必要です。これらは本アプリケーション ノートで詳しく説明しているように開発されるか、または独創的にすぐに使えるソリューションとして CY8CKIT-022 により提供されます。

「CY8CKIT-022」キットはサイプレスの「CY8CKIT-042 PSoC 4 Pioneer Kit」開発プラットフォームに接続されます。サンプル コード「CE202479」は、これら 2 つのキットを対象にする液面レベル センシングのサンプル プロジェクトを提供します。

図 2 に、「CY8CKIT-022」キットがどのように「CY8CKIT-042」キットに接続するかを示します。

図 2. CY8CKIT-042 に接続する CY8CKIT-022

3 システム理論

本節は静電容量センシングの原理の概要について説明します。CapSense の動作や設計の詳細については「Getting Started with CapSense®」設計ガイドおよび「PSoC® 4 CapSense® Design Guide」を参照ください。

3.1 CapSense の基本知識

静電容量型液面レベル センサーは、PCB、プラスチックあるいはガラスなどの非導電性素材上にある導電性パッドや配線です。図 3 に示すように、PCB 配線、パッドまたは他のセンサー接続の固有静電容量はセンサー寄生容量 (C_P) と呼ばれます。

図 4 に示すように、水などの対象物体がセンサーに接近すると、小量の液体静電容量 (C_L) が C_P に加えられます。液面レベル センシングは水がセンサーの近くにある時に増加した静電容量を測定します。

図 3. 静電容量型液面レベル センサーの静電容量と電界

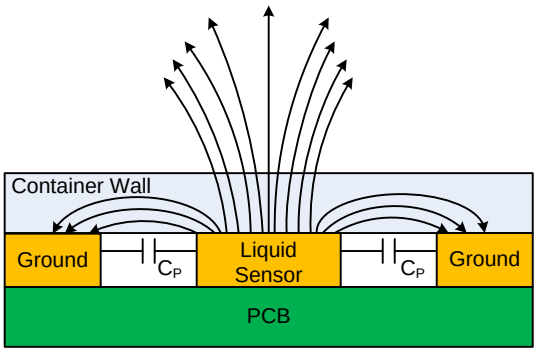
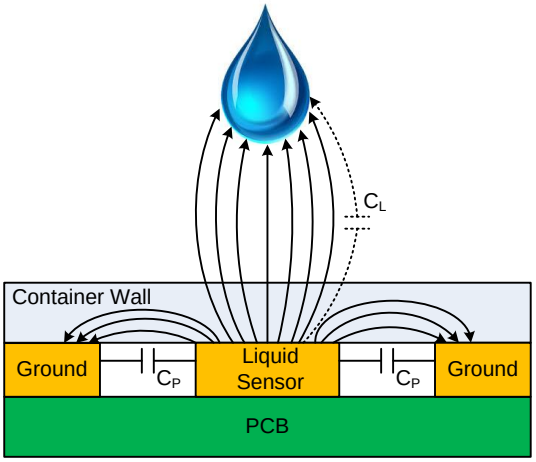


図 4. 液体が静電容量センサーに接近する時の増加した静電容量 (C_L)



PSoC Creator IDE に提供される PSoC 4 CapSense コンポーネントは、電流のデジタル-アナログコンバータ (IDAC) を使用して電流をセンサーに印加することで静電容量を測定します。タイマーはコンパレータを用いて、IDAC がセンサーの電圧を基準電圧になるまで充電するのにどれほどの時間が掛かるかを測定します。変換完了時に、IDAC の充電時間を測定するタイマーのカウント値は計算用の raw センサー値として使用され、通常はセンサー カウントとして見なされます。

3.2 環境の影響

液面レベル センシングの分解能と精度の両方に影響を与えるいくつかの重要な要因があります。これらの影響はセンサー静電容量の変動に起因し不正確な測定結果となります。

3.2.1 温度

動作中の温度の変動は性能に最も大きな影響を与えます。指動作型 CapSense ボタン (液面レベル センシングと比較して) の場合、押されていない時のセンサー値は周囲温度変化によるオフセットを考慮するために時間と共にトラッキングされます。この補正された非押圧値はベースラインと呼ばれます。タッチ アプリケーションでは、殆どの時間はセンサーがタッチされないため、これがあり得ます。また、比較的に短いタッチ イベントにより、センサーの値が瞬間的に大きく変化します。

液面レベル センシング アプリケーションでは、温度の補正は更に困難です。通常のタッチ無しの指動作 CapSense ボタンと異なって、液体センサーが任意の時間で任意のレベルまで液体に覆われることがあるため、液体センサーが液体に覆われないことを仮定できません。そのため、温度変動を補正するには、アルゴリズムと最適化されたセンサー設計を利用しなければなりません。また、温度が精度に影響を与えることを受け入れることも重要であり、許容できる精度レベルを得られるには設計のトレードオフを考慮する必要があります。特定の温度補正手法は各センサー パターンを説明する節で詳細に記載されます。

温度の第 2 の影響は結露です。周囲温度よりも著しく冷えた液体は、センサーの表面上に結露することがあります。結露により静電容量が高くなり、誤差もそれに伴って増加します。センサーの表面を絶縁することで低温テスト中の結露を削減できます。もう一つの技術として、液体容器とセンサー基板との間に小さな空隙を設けることです。最高性能を実現するために、空隙は 3mm を超えてはいけません。

3.2.2 寄生容量

寄生容量 (C_P) は、電子回路内の各部分が互いに近接するからという単なる理由で存在する望ましくない静電容量です。CapSense コンポーネントは、総静電容量を測定し、これは即ち、このコンポーネントのダイナミック レンジ範囲内の寄生容量と液体容量の合計 ($C_{TOTAL} = C_P + C_L$) です。C_L は固定値であるため、C_P が大きいほど、信号全体の液体部分が少なくなります。これは液体に対するシステムの感度を低下させ、結果的にシステム全体の精度も低下します。

CapSense 設計における寄生容量の主な要素は配線容量とセンサー容量です。C_P はセンサー サイズ、配線長、配線幅および配線間の間隔の要因からなる非線形関数です。C_P と PCB レイアウト機能との関係は簡単ではありませんが、一般的な原理があります。センサーのサイズまたは配線の長さと幅の増加、そして環状ギャップの減少はすべて C_P の増加につながります。C_P を低減する 1 つの方法としては、センサーとグランドとの隙間を広げることです。ただし、残念なことに、センサーとグランドとの隙間を広げると、ノイズ耐性が低下してしまいます。レイアウトの詳細は 4 に記述されます。

3.2.3 機械的変動

システム内の機械的変動は様々な形がありますが、いずれもセンサーの C_P に変化をもたらします。機械的変動には 2 種類があります。

1. 静的変動は通常、センサーの組み立て、PCB および液体容器へのセンサーの調整に関する製作公差から生じます。静的変動は理解し制御できれば、製造中に 3.5 と 3.6 で説明されるベースライン校正動作で補正されます。
2. 動的変動は動作中の変化から生じます。これらの変化は通常、センサー コンデンサの寸法を変更することで C_P の変化として現れます。温度変化と同様に、動的変動を補正することは困難です。センサーに対する機械的動的変動の影響を最小限にするようにシステムを設計することが一番良い方法です。

最も一般的な機械的変動は、コンデンサ極板間の距離の変更です。一方の極板がセンサーであり、残り一方の極板が液体表面です。これはセンサーを容器に接着する接着剤の気泡により起こることがあります。気泡は空気圧で膨張または収縮します。他の原因として、センサーが液体容器に直接接着されないため、容器壁とセンサー基板間に隙間があることです。これらの要因を低減するために、気泡がないことや機械的設計が正確なセンサー アライメントを維持できるようにすることを確保しなければなりません。

3.3 CapSense コンポーネントの設定

液面レベル センシングは PSoC Creator IDE の標準 CapSense_CSD コンポーネントを使用して液面レベル センサーをスキャンします。コンポーネントの機能は主にタッチ アプリケーションとタッチ ベースのベースライン アルゴリズムをサポートします。液面レベル センシングが固定ベースラインとカスタム液面レベル アルゴリズムを必要とするため、コンポーネントの標準タッチ ウィジェットや SmartSense™ 自動チューニング機能が提供する後処理を使用しません。代わりに生データの静電容量値のみ提供する**汎用**センサーを使用します。液面レベル センシング アルゴリズムを実装するためにカスタム ファームウェアを使用します。本節で言及していないパラメーターは液面レベル センシングに影響しないか、またはデフォルト値のままです。コンポーネント パラメーターとそのチューニングへの影響の詳細については、「PSoC® 4 CapSense® Design Guide」および「PSoC 4 CapSense_CSD Component」データシートを参照ください。

図 5 に示すように、CapSense コンポーネントを設定するには、まず**「General」**タブで**「Manual with run-time tuning」**をチューニング方法として選択します。或いは**「Manual」**のチューニング方法を選択しても良いですが、チューニング パラメーターがその後ハード コーディングされるため、開発中にチューニングするとより時間が掛かります。**「Auto (SmartSense)」**のチューニング方法を選択しないでください。これは液面レベル センシング向けに設計されていないため、チューニング ソリューションが不正確になります。

殆どの設計では**「Compensation IDAC」**が**「Disabled」**のままで良いです。それを**「Enable」**にして更なるチューニング オプションを求めることもできます。

図 5. CapSense コンポーネントの「General」タブ

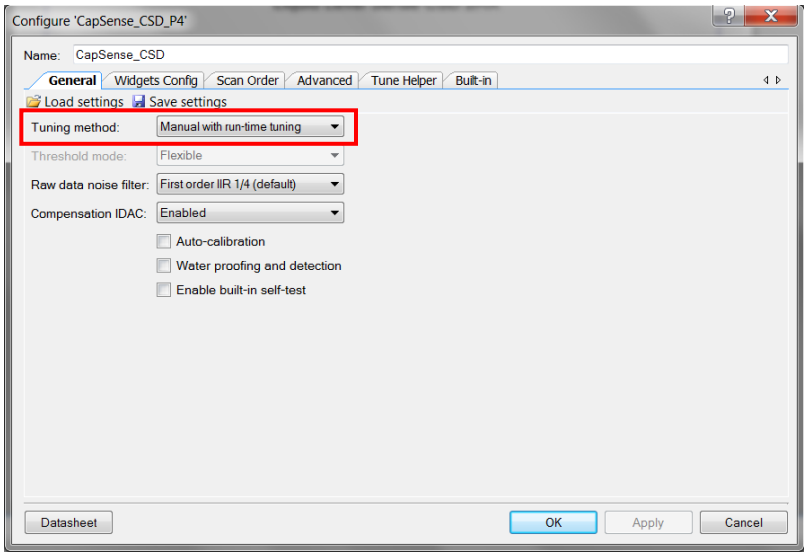


図 6 に示すように、「**Widgets Config**」タブで、「**Generics**」を選択し「**Add generic**」をクリックして、センサー要素の数を追加します。汎用センサーはタッチ処理オーバーヘッドが発生せずに生データの静電容量値のみを提供します。**スキャン分解能**は汎用ウィジェットが持つ唯一のチューニング パラメーターです。スキャン分解能は CapSense スキャンの最高分解能を決定し、結果的にスキャン時間も定まります。液面レベル センシング設計では、液面レベル センサーの分解能を向上するためにより長いスキャンを使用することがあります。開始時に分解能は 14 ビットが良いですが、性能に応じて後ほどそれを変更することができます。

図 6. CapSense コンポーネントの「Widgets Config」タブ

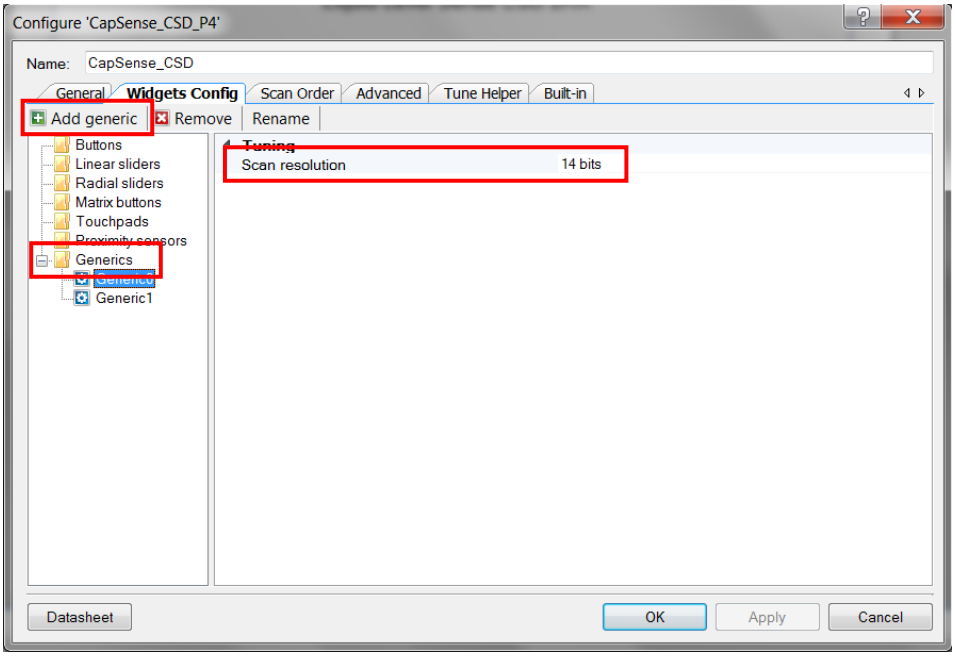
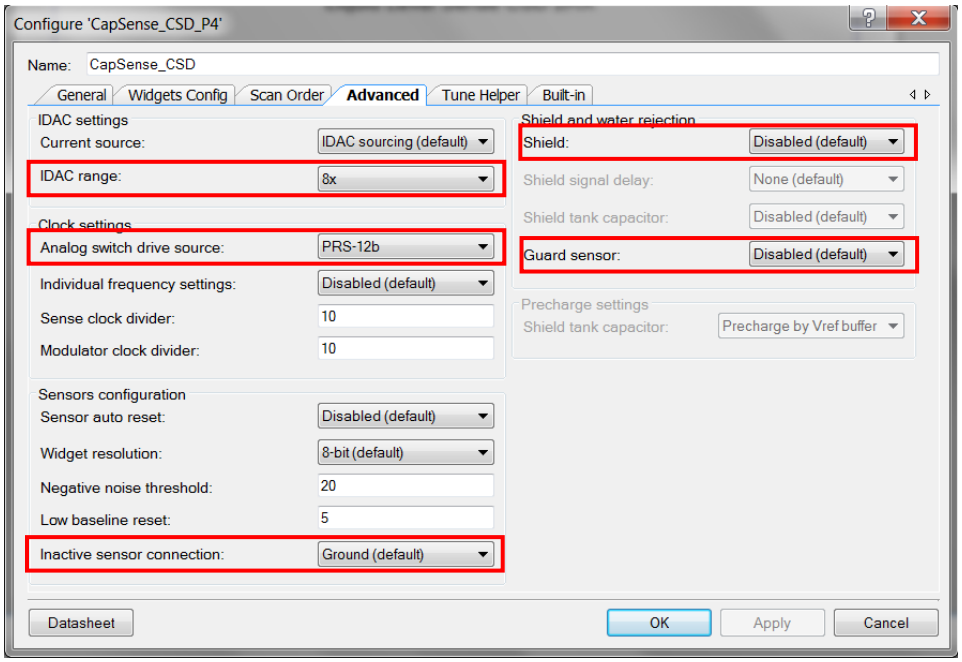


図 7 に示すように、「Advanced」タブではごく一部のパラメーターだけが液面レベル センシングに適用できます。チューニングが有効な生データカウント範囲に収まらない場合、「IDAC range」のデフォルト値 (4x) を変更しなければならないこともあります。これは「PSoC® 4 CapSense® Design Guide」のチューニング節にて説明されています。「CY8CKIT-022 Liquid Level Sensing Shield」キットの C_P が高いため、IDAC 範囲を 8x にする必要があります。センサー ノイズ耐性を最大限に向上させるためには、「Analog switch drive source」のパラメーターを「PRS-12b」に設定しなければなりません。**「Inactive sensor connection」**、**「Shield」**および**「Guard Sensor」**の目的がタッチ設計における液体の影響を減らすことであるため、それらすべてはデフォルト値のままにする必要があります。液面レベル センシング設計では、センサーに対する液体の影響を最大限にすることが望まれます。

図 7. CapSense コンポーネントの「Advanced」タブ



3.4 センサー パターンの選択

本アプリケーション ノートは 2 つのセンサー パターンに対応します。設計上の制約により求められる最適なセンサー パターンを判断するために、表 1 を参照ください。

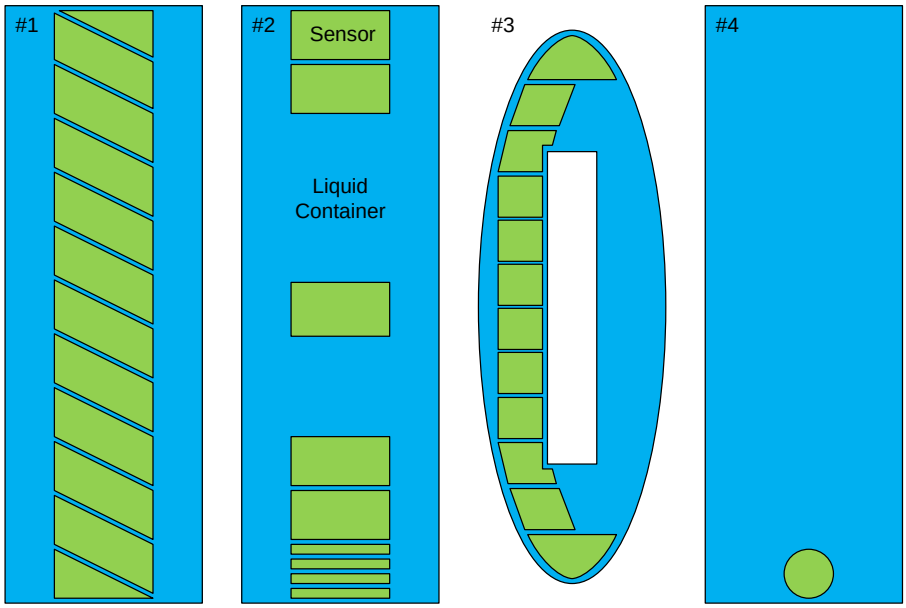
表 1. センサー設計の属性

センサー設計の属性	差動センサー	セグメント化センサー
必要な CapSense センサーの数	2	1 以上 (通常は 10～20)
センサー パターンの制約	2 つのセンサーは同じサイズおよび特定の三角形状である必要がある	各センサーは、異なるサイズおよび形状であっても良い
分解能	線形、～1mm	容器全体の高さに対するセンサーの数の割り算により決められる (1mm 以上)
精度	通常は、空になりつつある状態では 20%の誤差であり、満杯になりつつある状態では 5%の誤差に向上する	最大精度は最大のセンサーの高さに等しく、短いセンサーを使用することにより極端なレベルで精度を向上させることができる (通常は 5～10%)

3.5 セグメント化センサー

最も正確かつ柔軟なセンサー パターンは、液体容器の上部から下部まで均等の間隔で配置するセンサー セグメントの配列です。図 8 に示すように、センサー パターンの例#1 では、それぞれのセグメントは液体全体レベルの増加した分を示します。「セグメント化」パターンは、2 つのセンサーしかない差動バージョンに比べて多くのセンサー要素とピンを必要としますが、設計に応じて液面レベル センサーの分解能をカスタマイズすることができます。

図 8. セグメント化センサーの例



センサーの設計と配置は柔軟性に優れているため、特定の産業機器の設計に適合したセンサー形状にすることを可能にし、容器の特定の部分に応じた分解能を提供します。

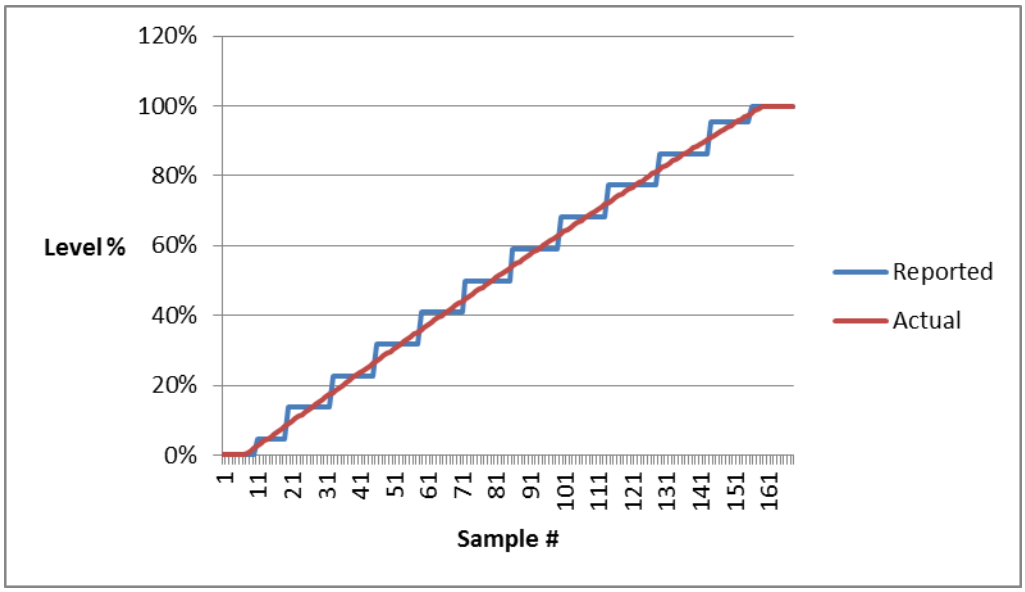
- センサーの高さ: 各々のセンサーの高さは配列にある他のセンサーから影響を受けません。センサーの高さを変更することにより、一部のセンサーが空や満杯のような極端なレベルで精度を増加させ、その一方、容器の真ん中での分解能は低下します。図 8 に示しているセンサー例#1 では、殆どのセンサーは同じ高さであるが、空と満杯レベルで精度を向上させるために、最上部と最下部のセンサーはその半分の高さです。
- センサーの形状: 形状が複雑な液体容器にセンサー配列を配置する場合、または産業機器の設計上の制約を満たせるように、個々のセンサーは幾何学的固体の任意の形状を持つことができます。一般的な制約は、図 8 の例#3 に示すように、カスタムのブロー成形の容器や注ぎ口や取り付けられるフランジ等センサーの配置を邪魔するようなものを含んでいます。
- センサーの配置: 図 8 の例#1 に示すように、センサーは通常、容器の高さに沿って均等に配置します。図 8 の例#2 に示すように、アプリケーションが特定のレベルでしか液面レベル情報を要求しない場合、センサーは幾つかのレベルに集まり、他のレベルでは完全にセンサーがないことがあります。図 8 の例#4 に示すように、容器に何も入っていない場合などの最下限の分解能では、単一のセンサーは単一の極端な液体レベルを示すことができます。

3.5.1 一般的な動作

セグメント化センサー パターンはいかなる動作条件下においても最高の精度を実現し、殆どの設計に対して最善の選択になります。センサーのセグメント化により、それぞれのセンサー要素が液面レベルをその限れられた範囲内で正確に測定することが可能になります。各センサーは、センサー半分が液体に浸かった状態になると、センサー カウントを標準値と比較することで 2 進数の出力を生成します。報告される液面レベルは液体に覆われた最も高いセンサーの高さです。サイズが均一なセンサー配列を使用する場合は、それが液体に覆われたセンサーの総数とそれぞれのセンサーの高さを掛けた合計です。

図 8 に示しているセンサー パターン例#1 では、最上部と最下部のセンサーはそれぞれ他のセンサーの高さと領域の半分であるため、空やフルのレベルで測定分解能と精度を上げます。高さが半分になっている 2 つのセンサーを組み合わせると 1 つのフルサイズのセンサーになり、結果的にフルサイズのセンサーに相当するセンサー数を 1 つ減らします。最大の液面レベル誤差は、100%を等間隔センサーの数で割った値になります。12 センサーの場合、最大誤差は、100%を 11 (11 = 10 全高さ + ½高さ + ½高さ) で割って全高さのセンサーの 9%となります。標準誤差は最大誤差の半分であり、例 1 のセンサーの場合は 4.6%となります。各センサーが 2 進数の出力を持つため、図 9 に示すように、セグメント化センサーの報告された液面レベルは実際の液面レベルと比べて階段状です。

図 9. 12 のセグメント化センサーの応答



3.5.2 液面レベルの計算

セグメント化センサーからの液面レベルの計算は簡単であり、次の 4 ステップを含みます:

1. センサーの静的ベースラインを測定

   各センサーの絶対値は液体が存在するかを判定するのに重要ではありません。理由は、センサーの寄生容量およびデバイス間のばらつきが、センサーのベース値と他のセンサーおよび完成品との関係に大きく影響を与えることがあるためです。使用前に、空の液体容器内の各センサーの生データ ベースライン値は定めておく必要があります。ベースライン値は、製造テストで製品ごとに測定し、不揮発性メモリに保存する必要があります。後続のブートアップで、ベースライン値は使用するために呼び戻されます。

   液面レベルは、動作の条件と温度がベースライン測定条件に最も近い場合に最も正確です。精度向上のため、動作温度範囲の中間の温度でベースライン値の測定をお勧めします。精度を向上させるオプションの方法として、温度センサーを使用して液体または容器の温度を測定し、実験的に導き出した範囲内でベースライン値を変更します。

2. センサー カウントから静的ベースラインを除去

   通常動作中、差分カウントが分かるために、各センサーのベースライン値は生データ値から減算されます。その後、差分カウントは正値に限定され、必要に応じて異なるサイズと静電容量値を持つセンサーに対応するために正規化された値にスケーリングされます。

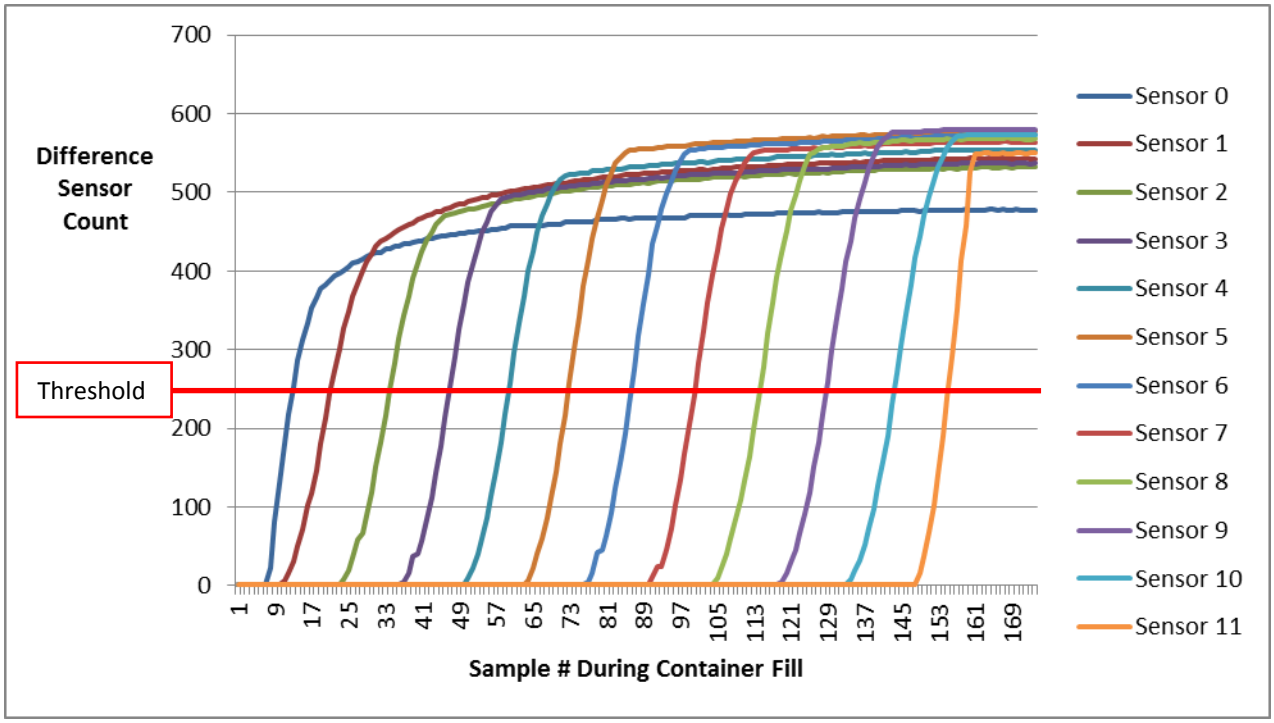
3. どのセンサー セグメントが液体で覆われているかを判定

   図 10 に示すように、センサーが液体で覆われているかどうかを判定するために、その差分カウントは閾値と比較されます。図 10 は、容器が液体で満たされる時の各センサーからの差分カウントを示します。図に示されたデータ サンプルは 1 秒間隔で記録されました。差分カウントが閾値を超える場合、センサーが覆われ、2 進数の状態が記録されたことが分かります。必要に応じて閾値の近くにあるノイズに起因したセンサー状態の変動を減少させるために、ヒステリシスを閾値に追加することができます。

液体で完全に覆われたセンサーの場合、閾値をセンサーの差分カウントの半分に設定する必要があります。最大閾値の半分では、広い動作温度範囲にわたって優れたレベル センシング性能を保証します。

大きさと間隔が等しいセンサーから成るセンサー配列は、覆われたセンサーの総数を記録することができます。大きさまたはセンサーの位置が不規則なセンサー配列は、どのセンサーが最も高くアクティブであるかを記録する必要があります。

図 10. 12 のセグメント化センサーの差分カウントと容器の充填中のサンプル番号



4. 液体の高さを計算

   覆われた大きさが等しいセンサーの総数が分かっている場合、覆われたセンサーの数にセンサーの標準高さを掛けます。センサーの標準高さは、センサー パターンの全高さをセンサーの数で割った値となります。覆われた最も高いセンサーが分かっている場合、各センサーの高さを含む配列からそのセンサーの高さを調べます。図 9 に示すように、両方の方法は階段状の結果になります。

   計算された液体の高さは、必要に応じてシステムの応答によりフィルタリングして、報告された高さをセンサー パターンの全高さで割ることで満杯状態に対するパーセントに変換することができます。

3.5.3 精度

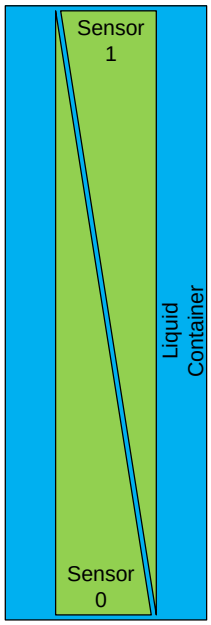
それぞれのセンサーが液体レベルに 2 進数の出力を提供するため、最大誤差は部分的に覆われた最も高いセンサーに限定されています。本節で説明する 12 センサー例の設計では、センサーの高さが 14mm であるため、標準誤差は±7mm (±4.6%) となります。この誤差は、全体誤差を構成する以下の 3 つの要素があります:

1. 数値化された誤差はセンサーの物理的な大きさの分解能によって形成され、センサーの高さの半分の±です。例えば、10mm 高のセンサーは±5mm の数値化された誤差があります。センサーの高さを低くすると精度が向上します。センサーの高さは通常、十分な信号レベルを確保するために、容器の壁の厚さ以上にするべきです。
2. 温度誤差は、素材の誘電率を変化させる、ベースライン温度からの温度変化によって発生します。液面レベル センシング アプリケーションの温度偏差は、一般的にセンサーのフルスケール値の 25%未満です。センサーの数を増やすと、誤差の温度要素が減ります。
3. ランダム誤差はパラメトリック偏差と、システム内の電子干渉により発生し、計算が困難です。ランダム誤差は決して除去できませんが、PSoC® 4 CapSense®デザイン ガイドに記述されている設計およびレイアウトの推奨事項に従うことで最小限にすることができます。

3.6 差動センサー

差動センサーの手法は、三角形のパターンで 2 つのセンサーの比を使用し、液面レベルを測定する低コストの方法を提供します。図 11 に示すパターンは、バックギャモンのゲームボードに似ているため、通常は「バックギャモン」パターンと呼ばれています。差動による方法は、セグメント化センサーに比べて精度が低いですが、センサーのコスト削減ができ 2 つのセンサーだけを必要とします。センサーのパターンは、値の比が液面レベルのパーセント値と等しくなるように形成された 2 つのセンサーで構成されます。

図 11: 差動センサーの例

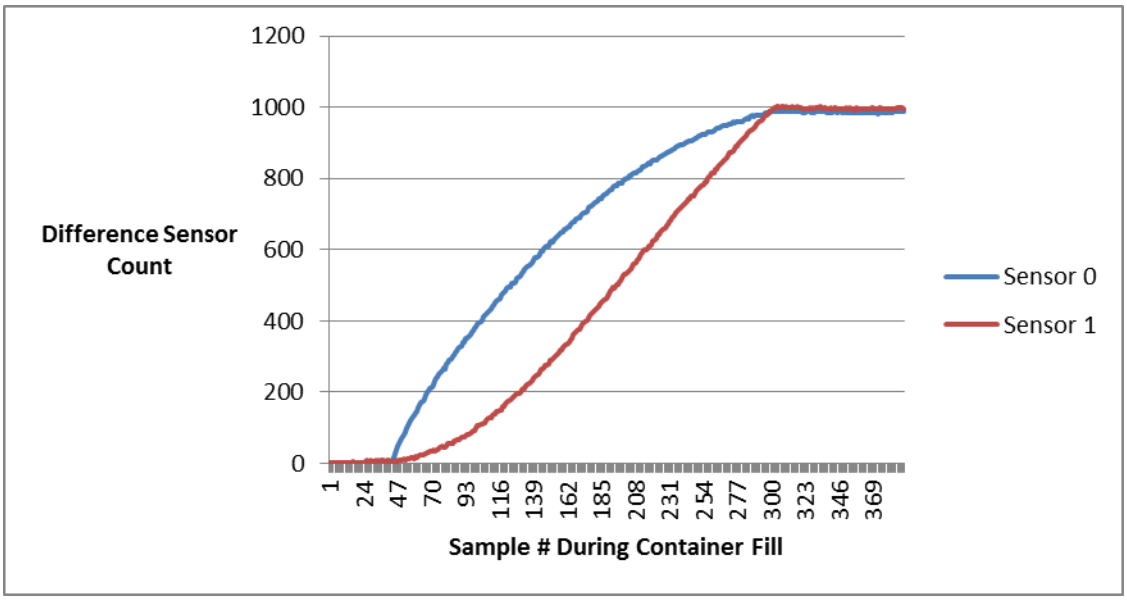


3.6.1 一般的な動作

最も単純なセンサー パターンは、2 つのセンサーだけを必要とする差動パターンです。差動パターンはセグメント化パターンに比較すると、空レベルの近くにある精度低下および 2 つのセンサーの厳しいレイアウト要件の 2 つの重要な違いがあります。

センサーの形状は直角三角形であり、その中、センサー0 の底辺とセンサー1 の底の頂点は空の液体レベルであり、反対側の辺と頂点は満杯の液体レベルでなければなりません。2 つのセンサーが液体で同じレベルに覆われている間、各センサーが覆われる全表面積は非常に異なっています。液体によって覆われるセンサー領域は、それぞれのセンサーで測定される全体の静電容量に直接関連します。図 12 から分かるように、センサー0 の値はセンサー1 の値より急激に増加します。理由は、センサー1 の小さな頂点と比べて、センサー0 の空のレベルの真上に液体と接触する面積は大きいためです。満杯レベルに近づくにつれ、センサー0 の変化率は頂点に近づくと低下し、その一方、センサー1 は 100%レベルに一定で上昇します。

図 12. 2 つのセンサーの差分値

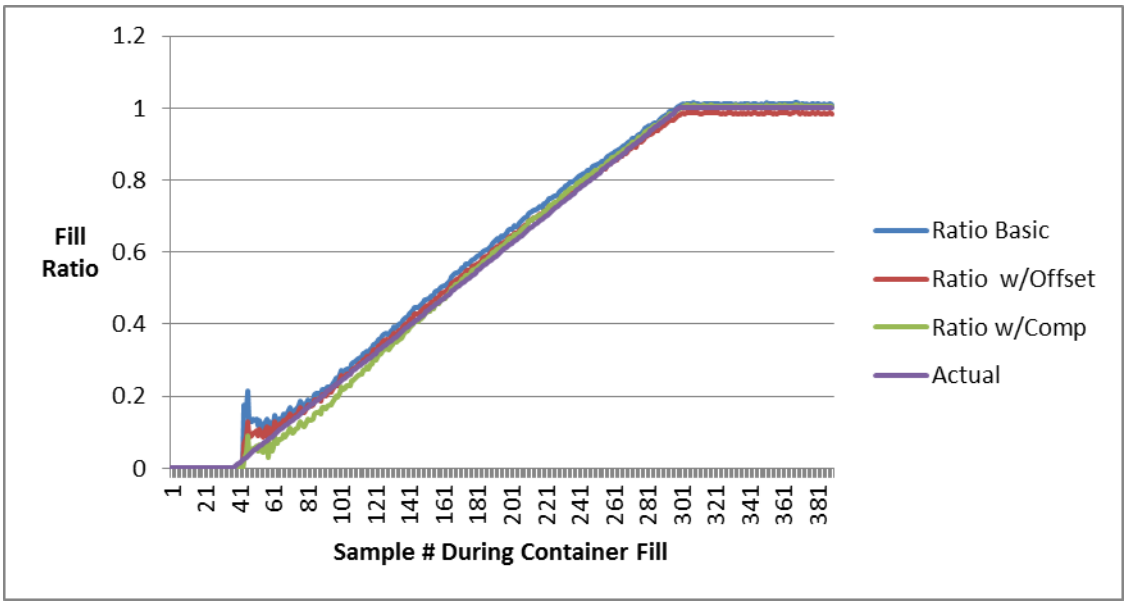


センサーのカウント値は空レベルに近づくと小さくなるため、どのセンサーの誤差も液面レベルで大きな誤差に拡大されます。液面レベルが上昇するほど、合計値で同じ誤差値の占める割合が小さくなるため、精度は満杯レベルで最も正確になります。そのため、差動センサーは空の容器で正確な測定を求める設計に使用すべきではありません。

センサーの差動の性質は、2 つのセンサーは正確に同じサイズで、液体に同じように露出し、同じ寄生容量を持っていることが必要です。最適に構成されたセンサー パターンであっても、計算された液面レベルに影響を与える誤差がありますので、報告されたレベルを補正する方法が提供されます。

図 13 に示すように、計算された液面レベルの出力はセグメント化センサー パターンより直線的で、「比率の基本」グラフでは、空レベルの近くに「スパイク状」の大きな誤差が発生します。

図 13. 2 つの差動センサーの応答



3.6.2 液面レベルの計算

差動センサーによる液面レベルの計算は簡単な比率計算です。4 つのステップがあります:

1. センサーの静的ベースラインを測定

   ベースラインの保存プロセスおよび理由はセグメント化センサー パターンと同じです。

2. センサー カウントから静的ベースラインを除去

   通常動作中、差分カウントが分かるために、各センサーのベースライン値は生データ値から減算されます。その後、差分カウントは正の値に限定されます。

3. センサー比を計算

   センサー比は、図 11 に示したセンサー パターンを使用する時、センサー1 をセンサー0 で割った値になります。結果の比率は図 13 の「比率の基本」グラフに表されています。

   方程式の分母であるセンサー0 の小さい値のため、センサー1 のどの誤差またはオフセットも、空のレベルの近くで比率が 0.2 スパイク (20%誤差) に拡大されます。この誤差を低減するために、センサー0 の値に小さな正のオフセットを追加することで誤差の影響を最小にします。サンプル データでセンサー0 の差分カウントに+25 カウントのオフセットを追加することで、図 13 の「オフセット付き比率」のように半分の誤差に低減します。オフセット値が大きいほど、空レベルの誤差は小さくなりますが、満杯レベルの誤差は大きくなります。+25 カウントのオフセットでは、あり得る最大比率は液面の満杯レベルの 0.98 に低下し、決して 100%満杯と報告されません。

   もう一つの特別なチェック条件はセンサー0 = 0 の場合に 0 で割るエラーです。これを避けるために、センサー0 = 0 の場合、比率の計算を省き、液面レベルを 0%に設定します。

4. センサー比を補正

   ステップ 3 で比率の誤差を低減する方法を見てきましたが、報告された液面レベルで元々の直線性の問題またはオフセットによる直線性の問題が発生する可能性もあります。図 13 の「補正付き比率」グラフは、「オフセット付き比率値のスロープおよびオフセットの変更を実施することで得られる精度の向上を示しています。スロープの小さな調整とオフセットの組み合わせは、空レベルの近くの誤差をさらに低減させ、満杯値が 1.0 (100%) の比率に達することを可能にします。補正比率は、オフセット比と実験的に導出された定数とを乗算した上で、一定のオフセット定数を加算することで計算されます。ほとんどの設計で、これらの定数は 1 の近くです。

   計算された液体の高さは、必要に応じてシステムの応答によりフィルタリングして、報告された比率をセンサー パターンの全高さと掛けることでミリメートルの高さに変換することができます。

3.6.3 精度

小さい数値が空レベルの近くで比率の計算に使用されるため、計算された液面レベルは空レベルの近くで精度が最も低いです。本節で説明される 2 つのセンサーの設計例では、空レベルの近くでは標準的な誤差は±15% (±23mm) です。この誤差は、以下の 3 つの要素により全体誤差となります:

1. 小さい数値の誤差は、小さい数値を比率の計算に使用する時に大きな誤差によって生じます。例えば、1 を 100 で割る場合は 1%誤差であり、1 を 2 で割る場合は 50%誤差です。この誤差は差動設計に固有のものですが、センサーの分母値に正のオフセットを追加することにで低減することができます。追加されたオフセットが増加すると、部分的に調整できる満杯レベルでの誤差も増加します。最適なオフセットおよびスロープ補正方程式中の定数は、設計ごとに実験的に決定しなければなりません。
2. 温度誤差は、ベースライン温度からの温度偏差によって生じるセンサーのオフセット値によって生成されます。液面レベル センシング アプリケーションの温度偏差は、一般的にセンサーのフルスケール値の 25%未満です。温度は両センサーに同時に影響を与えます。したがって、オフセットで部分的に打ち消し合うため、温度の影響は 25%未満になります。
3. ランダム誤差はパラメトリック偏差と、システム内の電子的な干渉により発生し、計算が困難です。ランダム誤差は決して除去できませんが、PSoC® 4 CapSense®デザイン ガイドに記述されている設計およびレイアウトの推奨事項に従うことで最小限にすることができます。

レシオメトリックの計算は精度を維持するために分数値を必要とします。浮動小数点数は使用できますが、コードは大きくなり、遅くなります。必要な精度を実現し、浮動小数点の数値や計算を避けるために、固定の高精度値を使用します。固定の高精度の数値や計算にあまり詳しくない場合、https://en.wikipedia.org/wiki/Fixed-point_arithmetic および https://en.wikipedia.org/wiki/Binary_scaling にて関連記事をご参照ください。

4 センサー レイアウト

4.1 一般的なレイアウトの注意事項

液面レベル センサーのレイアウト ガイドラインは、PSoC® 4 CapSense®デザイン ガイドに記載されている CapSense タッチのレイアウト ガイドラインとほぼ同じです。したがって、本アプリケーション ノートでは重要なハイライトおよび相違点だけを説明します。

- 工業デザインでは、センサーおよび配線が導電性素材や干渉源から分離されることを保証する必要があります。空気の比誘電率が最も低い (1.0) ですから、エアギャップは導電性物体からの最高の分離を実現します。ハッチング グランド プレーンを使用する場合、少なくとも 5mm のエアギャップは優れた分離を実現します。導電性物体がセンサーに近づく時、ハッチング ラインと導電性物体の間でリークするセンサーの電界が増加するため、ハッチング グランドの効果は下がります。
- 液体容器は任意の非導電性素材が可能です。比誘電率の高い素材はセンサーの信号レベルを増加して、性能を向上できます。素材のガイドラインは、表 2 に示すタッチ アプリケーションのオーバーレイ素材と同じです。

  表 2. 容器素材の比誘電率

素材	ε_r
空気	1.0
ガラス (一般的なもの)	7.6～8.0
ガラス (セラミック)	6.0
ポリカーボネート (Lexan®)	2.9～3.0
アクリル (Plexiglass®)	2.8
ABS	2.4～4.1

- 薄い壁がセンサー信号レベルを増加させるため、容器の壁の厚さは最小限にする必要があります。5mm より薄い容器の壁は最高の性能を実現します。厚い壁はスキャン時間を増やし、精度を低下させる可能性があります。
- センサーから容器への接着材料は非導電性で、高誘電率であることが必須です。3M™製の 467MP および 468MP 転写テープは優れた性能を実現します。

- 寄生容量 C_P は、液体に対するセンサーの応答を最大化にするために最小限にする必要があります。センサー パターンの各センサー面積は 3,000mm^2 未満とします。センサー間の空間は、容器の壁の厚さまたは 1mm のいずれか大きい方の数値にすべきです。最小のセンサー面積は 25mm^2 ですが、最適性能は 150mm^2 近辺です。
- センサーおよびプリント基板の厚さは、センサーとグランド面の間のギャップを最大化するために 0.25mm より大きくする必要があります。
- センサー配線幅は 7mil (0.18mm) 以下であり、配線間隔は 10mil～20mil (0.25mm～0.51mm) である必要があります。配線長は最小限にし、理想的には 30cm 以内にする必要があります。
- センサー配線は、相互作用を減らすために液体表面と反対側のプリント基板の表面上で配線する必要があります。配線はスイッチング信号から少なくとも 0.25mm 隔て、理想的にはそれらの間にグランドを設ける必要があります。センサー配線がスイッチング信号を交差しなければならない場合、直角に交差させる必要があります。
- センサーの電子干渉に対する耐性を増加させるために、センサー配線が存在しているプリント基板の最上層と最下層にグランド面を設ける必要があります。センサーの C_P を最小限にするために、センサーおよび配線の上側と下側のグランド面は 17%の銅でハッチングする (7mil ライン、70mil 間隔) 必要があります。他のすべての領域は、高精度アナログ回路用に最適化された全面 グランド面を使用する必要があります。
- 電源デカップリング コンデンサは PSoC CapSense の高感度アナログ システムでノイズを最小限にするため、デバイス データシートで推奨するように提供する必要があります。
- センサー用 GPIO ピンは EMI 耐性を向上させるために、できる限りピンの近くに配置される、センサーと直列に 560Ω の抵抗を接続する必要があります。

4.2 セグメント化センサー パターンの注意事項

センサーはいかなる実践的な形状になることもできるため、セグメント化センサー パターンに対しては追加の要件はありません。

4.3 差動センサー パターンの注意事項

差動センサー パターンは、性能を保証するために以下の追加制約があります:

- 両方のセンサーは同じ C_P を提供するために、できるだけ同じサイズにする必要があります。
- 両方のセンサー配線は同じ C_P を提供するために、同じ配線をする必要があります。
- 図 11 に示すように、両方のセンサーは正確に配列され、対称の直角三角形を形成しなければなりません。
- 各センサーの最適な高さと幅のアスペクト比は 8:1 です。センサーのアスペクト比は 16:1～1:1 の範囲内に入る必要があり、低いほど精度が高くなります。

5 要約

本アプリケーション ノートは、静電容量型液面レベル センシングの設計および実装ガイダンスを提供しました。2 つのセンサー パターンおよびアルゴリズムは、要件を満たすように設計を最適化するために記述しました。

改訂履歴

文書名: AN202478- PSoC® 4 - 静電容量型液面レベル センシング

文書番号: 002-15787

版	ECN	変更者	発行日	変更内容
**	5414612	HZEN	08/25/2016	これは英語版 002-02478 Rev. **を翻訳した日本語版 002-15787 Rev. **です。

ワールドワイドな販売と設計サポート

サイプレスは、事業所、ソリューション センター、メーカー代理店および販売代理店の世界的なネットワークを保持しています。お客様の最寄りのオフィスについては、サイプレスのロケーション ページをご覧ください。

製品

車載用	cypress.com/go/automotive
クロック & バッファ	cypress.com/go/clocks
インターフェース	cypress.com/go/interface
照明 & 電源管理	cypress.com/go/powerpsoc
メモリ	cypress.com/go/memory
PSoC	cypress.com/go/psoc
タッチ センス	cypress.com/go/touch
USB コントローラー	cypress.com/go/usb
ワイヤレス／RF	cypress.com/go/wireless

PSoC®ソリューション

psoc.cypress.com/solutions

PSoC 1 | PSoC 3 | PSoC 4 | PSoC 5LP

サイプレス開発者コミュニティ

コミュニティ | フォーラム | ブログ | ビデオ | トレーニング

テクニカル サポート

cypress.com/go/support

PSoC はサイプレス セミコンダクタ社の登録商標であり、PSoC Creator は同社の商標です。本書で言及するその他すべての商標または登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

Cypress Semiconductor
198 Champion Court
San Jose, CA 95134-1709

Phone : 408-943-2600
Fax : 408-943-4730
Website : www.cypress.com

© Cypress Semiconductor Corporation, 2015-2016. 本文書に記載される情報は、予告なく変更される場合があります。Cypress Semiconductor Corporation (サイプレス セミコンダクタ社) は、サイプレス製品に組み込まれた回路以外のいかなる回路を使用することに対して一切の責任を負いません。サイプレス セミコンダクタ社は、特許またはその他の権利に基づくライセンスを譲渡することも、含意することもありません。サイプレス製品は、サイプレスとの書面による合意に基づくものでない限り、医療、生命維持、救命、重要な管理または安全の用途のために使用することを保証するものではなく、また使用することを意図したものでもありません。さらにサイプレスは、誤動作や故障によって使用者に重大な傷害をもたらすことが合理的に予想される生命維持システムの重要なコンポーネントとしてサイプレス製品を使用することを許可していません。生命維持システムの用途にサイプレス製品を供することは、製造者がそのような使用におけるあらゆるリスクを負うことを意味し、その結果サイプレスはあらゆる責任を免除されることを意味します。
このソースコード (ソフトウェアおよび／またはファームウェア) はサイプレス セミコンダクタ社 (以下「サイプレス」) が所有し、全世界の特許権保護 (米国およびその他の国)、米国の著作権法ならびに国際協定の条項により保護され、かつそれらに従います。サイプレスが本書面によりライセンシーに付与するライセンスは、個人的、非独占的かつ譲渡不能のライセンスであり、適用される契約で指定されたサイプレスの集積回路と併用されるライセンシーの製品のみをサポートするカスタム ソフトウェアおよび／またはカスタム ファームウェアを作成する目的に限って、サイプレスのソース コードの派生著作物をコピー、使用、変更そして作成するためのライセンス、ならびにサイプレスのソース コードおよび派生著作物をコンパイルするためのライセンスです。上記で指定された場合を除き、サイプレスの書面による明示的な許可なくして本ソース コードを複製、変更、変換、コンパイルまたは表示することはすべて禁止します。
免責条項: サイプレスは、明示的または黙示的を問わず、本資料に関するいかなる種類の保証も行いません。これには、商品性または特定目的への適合性の黙示的な保証が含まれますが、これに限定されません。サイプレスは、本文書に記載される資料に対して今後予告なく変更を加える権利を留保します。サイプレスは、本文書に記載されるいかなる製品または回路を適用または使用したことによって生ずるいかなる責任も負いません。サイプレスは、誤動作や故障によって使用者に重大な傷害をもたらすことが合理的に予想される生命維持システムの重要なコンポーネントとしてサイプレス製品を使用することを許可していません。生命維持システムの用途にサイプレス製品を供することは、製造者がそのような使用におけるあらゆるリスクを負うことを意味し、その結果サイプレスはあらゆる責任を免除されることを意味します。
ソフトウェアの使用は、適用されるサイプレス ソフトウェア ライセンス契約によって制限され、かつ制約される場合があります。