

CDC を使ったサンプル吸引のモーション制御

著者 : Jim Scarlett

はじめに

化学分析のようなアプリケーションでは、ある容器から別の容器へ液体を移す必要があります。代表的な例としては、インビトロ診断システムや血液分析器があります。これらのシステムでは、効率よくサンプルをキュベットから吸引する機能や試薬をビンから吸引する機能が必要です。これらの装置は多くの場合多数のサンプルを処理するラボ用システムなので、できるだけ速くサンプルを処理することが重要です。したがって、吸引に使用するプローブを高速で動かして、処理時間に対するプローブ・モーションの影響を最小に抑える必要があります。

プローブを効率よく動かすには、吸引対象の液体の表面に対するプローブの位置を正確に決定する必要があります。このアプリケーション・ノートでは、容量デジタル・コンバータ (CDC) を使って、高い信頼性レベルでプローブの位置を決定する方法を示します。

CDC テクノロジー

基本的なレベルでは、シグマ・デルタ (Σ - Δ) A/D コンバータ (ADC) はシンプルな電荷平衡回路を使います。既

知のリファレンス電圧と未知の入力電圧を既知のオンチップ固定入力コンデンサの両端に印加します。ここで、電荷平衡回路により未知の入力が決定されます。 Σ - Δ 型 CDC の場合、未知の値は入力コンデンサです。既知の励起電圧が入力に与えられると、電荷平衡回路を使って未知のコンデンサの値の変化を検出します (図 1 参照)。この設定により、 Σ - Δ ADC の分解能と直線性が維持されます。

CDC の集積回路は多くの方式があります。AD7745 や AD7746 などのデバイスは図 1 に示すように動作します。ここで、コンデンサの片方の電極は励起出力に接続されており、コンデンサの他方の電極は CDC の入力に接続されています。AD7747 のようなデバイス (単電極デバイス) は、容量を測定するのと同じ電極に励起電圧を印加します。この場合、もう一方の電極は接地された電極で、これは実際の電極でも、アプリケーションを使用している人の指でもかまいません。単電極 CDC は、現在使われている多くのタッチスクリーンの基礎として用いられています。どちらのタイプの CDC もプローブの位置を決定するのに使用することができます。

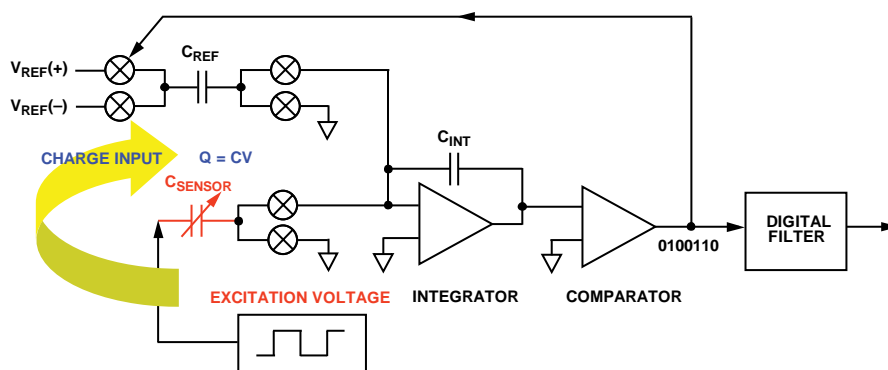


図 1. 基本的な CDC アーキテクチャ

アナログ・デバイス社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイス社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。*日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

Rev. 0

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ・デバイス株式会社

本社 / 〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル
電話 03 (5402) 8200
大阪営業所 / 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー
電話 06 (6350) 6868

目次

はじめに	1	データの正規化	4
CDC テクノロジー	1	勾配と不連続性の利用	4
改訂履歴	2	方法	5
コンデンサ	3	まとめ	6

改訂履歴

6/14—Revision 0: 初版

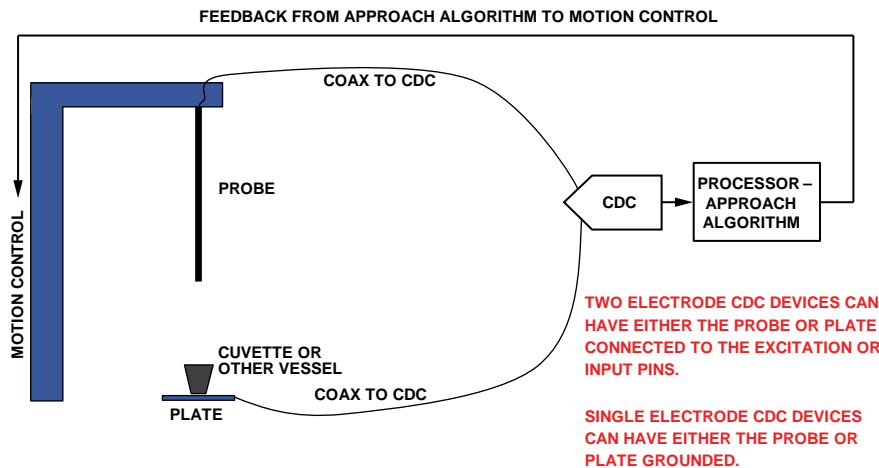


図 2. CDC を使った液体表面に対するプローブの位置決定

コンデンサ

簡易的には、コンデンサは、間に誘電体を挟んだ 2 枚の平行なプレートとして記述できます。

プレートのサイズ、片方のプレートの他方のプレートに対する向き、誘電定数などの要因により容量値は変化します。これらの変数を使って、通常とは異なるコンデンサの変化する値を測定して、液体表面を規準にしたプローブの位置を決定することができます。

吸引システムでは、コンデンサは、キュベットなどの容器の下に置かれた導体プレートと、動いているプローブ自体で構成されます (図 2 参照)。AD7745 のような CDC を使用して、励起信号をコンデンサの片方の電極に与え、コンデンサの他方の電極を CDC の入力に接続します。どの電極が励起信号または CDC 入力に接続されるかに関係なく、測定される容量値は同じです。このコンデンサの絶対値はプレートおよびプローブのフォームファクタ、誘電体の混在状態、プローブからプレートまでの距離および環境要因に依存します。誘電体には、空気、キュベットおよびキュベット内の液体が含まれることに注意してください。吸引システムでは、プローブがプレートに近づくにつれて (さらに重要なのは液体表面に近づくにつれて)、これら誘電体の混在状態が変化していく性質を解析します。

プローブがプレートに近づくにつれ容量値が増加します。この変化の性質は整級数の関数 (2 次) であることが観察されています。プローブが空のキュベットに近づくときの容量値を図 3 に示します。ただし、プローブの進路に液体が存在すると、この整級数の係数が変化します。液体は空気より誘電定数が高くなるので、液体がプローブとプレートとの間の誘電体の大きな割合を占めると、容量値はより急速に増加します。プローブが液体の表面に近づくと、測定される容量値の増加が加速します (図 4)。この加速は、プローブが液体の表面に近づいていることを判断する助けになります。

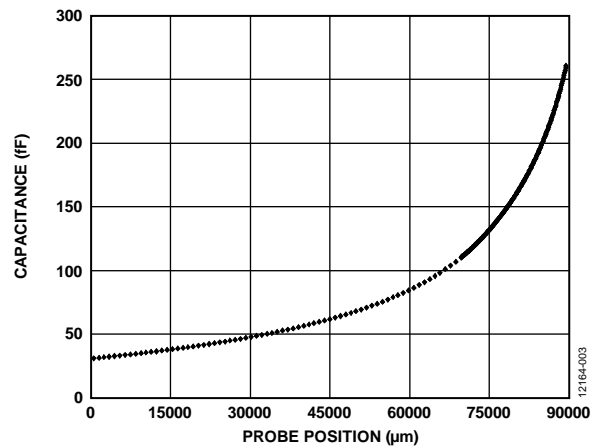


図 3. 空のキュベットの容量値の測定

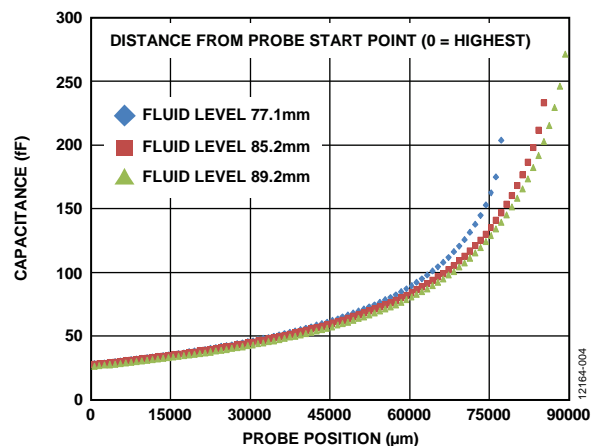


図 4. 液体が入ったキュベットの容量値の測定

データの正規化

図3と図4に示すいくつかの曲線の違いは、液体の水位の決定に関して測定の信頼性を高める方法を示しています。ある基準点に対するプローブの位置が正確に分かっている場合、液体が存在しない状態で様々なポイントでシステムの特性を評価することができます。このような特性評価により、図3に示す曲線に似た曲線が得られます。この特性評価データを利用できると、プローブが液体表面に近づくとき収集されたデータを正規化することができます。

図5に示すように、接近時のデータから液体のないときの特性評価データを引くだけで正規化を行うことができます。

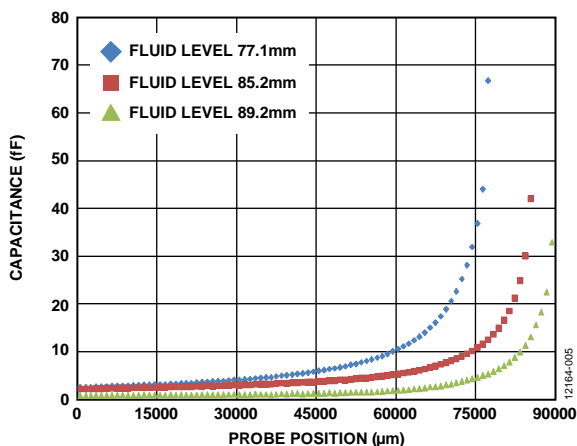


図5. 正規化された容量値測定

環境要因（温度、湿度など）の変化を除くと、正規化により、容量値測定に対するシステム固有の要因の影響が除去されます。電極のサイズ、プローブからプレートまでの距離、および空気と（液体なしの特性評価で使用されている場合）キューベット自体の誘電効果が測定から除去されます。実質的に、このデータは混在している誘電体に液体を加えた効果を表すこととなります。接近手法の解析により、図5に示されているような正規化されたデータは接近時の制御を容易にし、安定させることができることは明らかです。

ただし、正規化されたデータを常に利用できるわけではありません。たとえば、モーション制御システムが正確に位置を決めるのに十分なほど精密ではないことがあります。モーター・コントローラとの通信リンクが、CDCの出力レートに比べて相対的に遅いこともあります。ただし、たとえ正規化されたデータを利用できなくても、このアプリケーション・ノートでこれ以降説明する方法は十分役立ちます。当社のラボで行ったほとんどのテストではこのようなデータを使いませんでした。

勾配と不連続性の利用

図4、図5に示すように、プローブが液体表面に近づくにつれ、測定される容量値は加速度的に増加します。この情報を使って、プローブが表面に接近するときのプローブの速度を制御することができるはずですが、それほど簡単にはいきません。たとえば、液体の水位が低いと容器の表面にプローブが近づくにつれ容量値の生の測定値は高くなり、容器内の液体の水位が高いと低くなります。正規化データを使うと、これが反対になります。この事実により、プローブの速度を変える最良のタイミングを決定するしきい値を見きわめるのがさらに困難になります。

ただし、代わりに勾配を使って、容量測定値の加速度的増加の利点を利用することが可能です。定義により、勾配は位置変化に対する容量値の変化です。ただし、プローブを一定の速度で動かす場合、ある容量の測定値を次の測定値から単純に差し引いて勾配を近似すれば十分です。図6は図5で使われたのと同じデータの勾配をプロットしたものです。

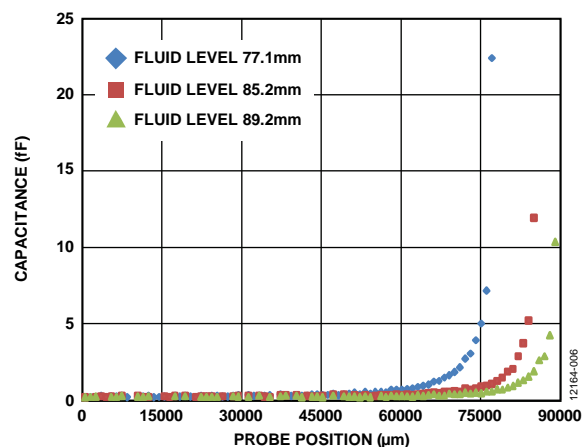


図6. 勾配（正規化した容量値）

容量の生の測定値または正規化した測定値の勾配は、液体の水位が変化する場合、測定値自体よりもはるかに安定していることを実証しています。液体の水位に関係なく一貫して有効な勾配のしきい値を求めるのは比較的簡単です。勾配のデータは容量値のデータよりランダムに変動することがあります。したがって、平均化が有効なことがあります。図6に示すように、プローブの行程の大部分において、計算された勾配は小さな範囲に留まります。勾配の値がこの範囲を超えると、プローブは液体表面の非常に近くに来ています。この手法により、当社のラボで非常にロバストな接近プロファイルが得られました。

プローブが液体表面に近づくときの吸引システムの挙動を示しました。しかし、この方法の重要な特性は、プローブが液体に接触するとき明らかになります。図7. に示すように、このポイントに大きな不連続性が存在します。この不連続性は容量値曲線の通常の加速度的変化の一部ではありません。当社のラボでこのポイントで測定した容量値は、プローブを液体に進入させる前に得られた測定値の2倍を超えていることが観察されました。システム構成が異なると、この関係も変わってることがありますが、安定しており、一貫していることが観測されています。不連続性が大きいので、液体の表面を貫通したことを十分に高い信頼性で示す容量値のしきい値を見つけるのは比較的容易です。吸引動作の目標の1つはプローブを小さな既知の距離だけ液体の中に入れることなので、このように使いやすいたことが重要です。

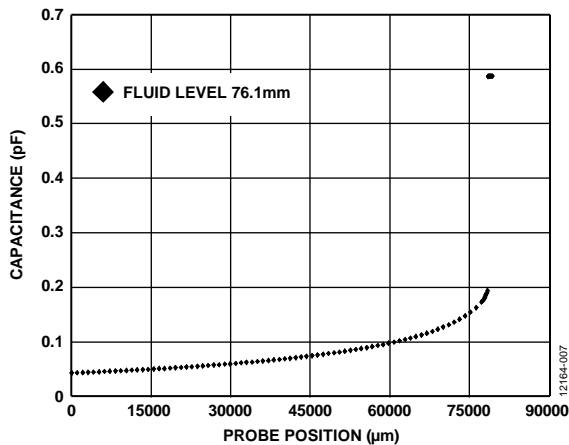


図7. 液体表面の不連続

吸引システムでは、プローブを速くまで駆動しすぎて（つまりキュベットの底を突き抜いて）損傷を与える危険を最小に抑えつつ、プローブの全ての動作をできるだけ高速で行うことによってスループットを最大にすることが重要です。高精度モーター制御システムを常に利用できるわけではないので、プローブの正確な位置が未知であってもソリューションは正しく動作する必要があります。上に述べた測定値は、高い信頼性レベルでこの高速プローブ・モーションを可能にします。

方法

プローブを液体に進入させるのに使用する技法の概要を示すフローチャートを図8に示します。

1. プローブが液体表面に近づくまで、プローブをできるだけ高速で動かします。位置情報や利用できるコンピュータの能力および事前ほどの程度システムの特性評価が可能かにより、容量値曲線の勾配を決定して勾配のしきい値を適用するか、または整級数を計算して、容量値のしきい値を使い最適位置を決定することができます。この接近プロファイルは、容量の測定値の勾配のしきい値を設定することにより、当社のラボで開発されました。曲線を滑らかにして決定の信頼性を上げるには平均化を使うことができます。前に述べたように、可能ならば容

- 量値のデータを正規化すると、システムがもっとロバストになることも観察されています。
2. プローブが表面に十分近づいたと判断されると、液体表面への最終接近のため、プローブの速度が大きく減少します。効率を最大にするにはプローブを液体表面にできるだけ近づけることが重要です。ただし、液体表面を貫通する前に接近速度が十分低下していることを検証することが重要です。減速により、プローブ深度が確実に制御されます。
3. 接触時に生じる不連続に注意することによって、液体表面との接触が判断されます。（当社のラボで行われたような）容量値のしきい値を使うか、または容量曲線の勾配を決定して勾配のしきい値を適用することにより、不連続性を判断することができます。ランダムな測定変動を減らすには、平均化を使うことができます。ただし、シフト量が大きいので、平均化を使わなくても高い信頼性で検出することができます。表面検出のロバスト性改善にも、前述した容量値データの正規化を使うことができます。ただし、その効果は接近時ほど大きくはありません。
4. 次に、プローブを予め決められた距離だけ水面下に駆動することができます。この動きの制御は、精密なモーター制御を利用できれば簡単です。精密なモーター制御を利用できなくても速度見積が可能であれば、プローブを一定時間動かす方法とれます。

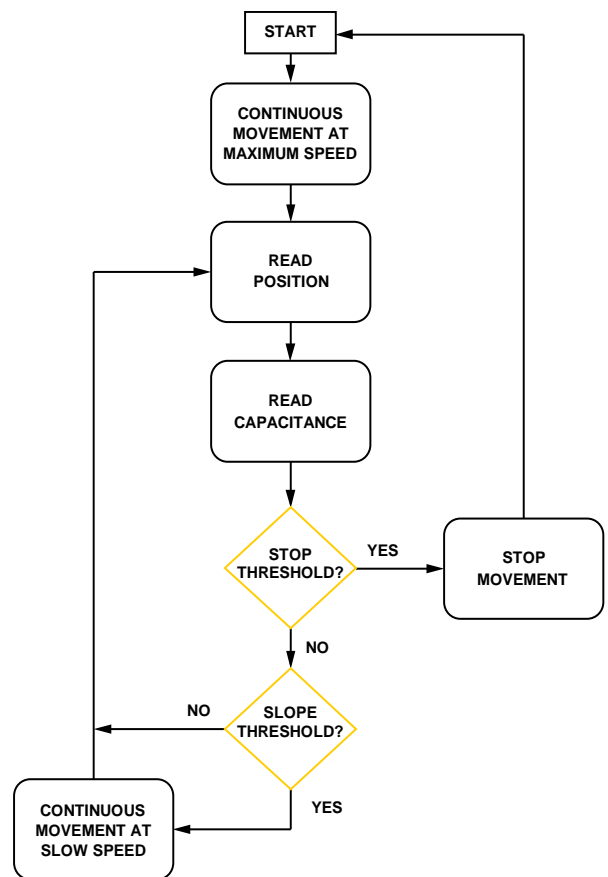


図8. 簡略化したモーター制御フロー

液体に進入するとき、容量の測定値に2つの興味深い特性が見えます。第一に、プローブが液体内を進むにつれ測定値の変化は比較的小さくなる様です。理想的には、一定の変化率であれば貫通深度を決定するのに役立ちますが、このような変化は観察されませんでした。第二に、図9に示すように、容器内の液体の水位が異なっても測定値はほとんど変化しませんでした。満たされた容器の表面にわずかに進入した後測定した容量値と、空に近い容器で測定した値は基本的に同じでした。

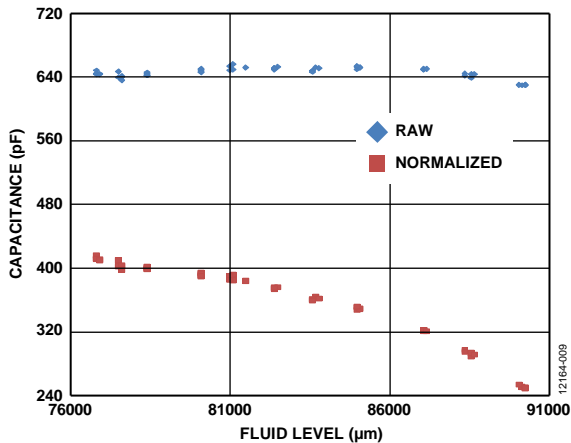


図9. 液体のレベルと容量値

この平坦な応答は生の容量値の測定の場合に当てはまりました。ただし、前述したデータの正規化を行うと差が観測されました。液体の水位が下がるにつれ、正規化された容量値も下がりました。この変化は、モーション制御システムから信頼性の高い位置データを得られない状況で、液体の水位が下がりつつあるかどうかを判断するのに役立ちます。

液体表面を貫通した後プローブを停止させるのに要する時間は、モーター制御システム自体を含む複数の要因に支配されます。ただし、注意深くプランされた接近プロファイルは、最終段階までプローブの速度を最大に保ちながら、プローブの貫通の精密制御を保証することができます。当社のラボでは、最大速度での容量測定間隔の間に約0.45 mm動くプローブは、表面を貫通して0.25 mm以内に停止しました。もっと早いサンプリング・レートでは、サンプリング間隔の間に約0.085 mm動くプローブは、液体表面の0.05 mm以内に停止しました。両方の場合とも、液体表面の1 mm～3 mm以内までプローブを最大速度で動かし、効率とスループットを最大化できました。

まとめ

このアプリケーション・ノートでは、集積化 CDC の従来とは異なる使用方法について詳細に説明しました。集積化 CDC は、信頼性を維持しつつ、多くのテクノロジーに比べて単純なソリューションを提供します。容量値と勾配の両方の測定値を使ってモーション制御に影響を与える接近プロファイルを示し、さらに高い信頼性と追加情報を与える別の実施方法についても論じました。CDC をベースにしたソリューションは、表面を貫通した後プローブを素早く安定に停止させ、しかも最後までプローブ速度を最大化することが可能です。

尚、このアプリケーション・ノートでは、吸引プローブの制御への CDC テクノロジーの応用のほんの一部に触れたにすぎません。エンジニアは、このアプリケーション・ノートで概説されている手法を、より良いソリューションに向けての出発点として利用し、特定の状況に合うようにこの手法を手直しして使用できます。