

水耕栽培用センサの小型回路実装と性能評価

西村知紘¹ 奥山雄司² 松下綾香¹ 佐藤証¹

概要: 水耕栽培用に液肥濃度と水位をシンプルな発振回路で構成することで、安価ながら実用的な精度を実現するセンサを開発した。棒状のプリント基板上的金属配線間の抵抗および静電容量が液肥に浸かることによる変化を発振周波数として計測する。計測および通信にマイコンチップをセンサ基板上に実装し、高い汎用性も有している。本センサを用いた実験で、温度、液肥濃度、水位、発振周波数の関係を調べ、実測値を補正する式を導出した。

Compact Hardware Design and Performance Evaluation of Sensor Device for Hydroponics Culture

TOMOHIRO NISHIMURA¹ YUJI OKUYAMA² AYAKA MATSUSHITA¹
AKASHI SATOH¹

1. はじめに

IoT 技術を応用して生育環境をセンサでモニタし制御しながら農作物の栽培を行うスマート農業が広がりを見せている[1]-[3]。これに対して我々は、都市のビルの屋上やベランダ等の遊休スペースを活用し、個人でも本格的な果菜類の栽培が可能な楽しむ農業の実現に向け、水耕栽培装置とそこで用いるセンサモジュールの開発を進めている。生産性の向上を目的とし、高精度と高信頼性が必須の植物工場用のセンサモジュールは十~数十万円と非常に高価なものとなっている[4]。そこで我々は、高精度な計測を可能な限りシンプルな回路で実現するセンサを開発し、個人で利用可能な低価格化と、それをを用いた水耕栽培装置の事業化を目指している。

DICOMO2016 では、フラットケーブルの容量変化で水位を、その先端にある電極間の電気伝導度 (EC 値) で液肥濃度を測定する試作センサモジュールの発表を行った[5]。このフラットケーブルと電極は発振回路の構成部品となって

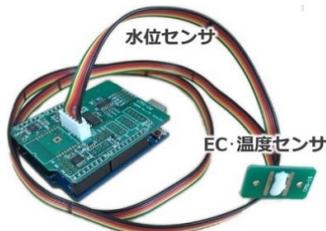


図1 既開発の水耕栽培用試作センサモジュール

おり、水位と EC 値は発振回路の動作周波数に変換される。この発振回路はマイコンボード Arduino 専用のオプション基板となっており、周波数の計測は Arduino で行うため、Arduino 以外では利用できなかった。またフラットケーブルは安価で防水性に優れるものの、水中での形状が安定せずそれが測定値に影響し、先端の電極の前面には十分な養液のエリアがないと正確な計測ができないといった問題があった。

そこで本論文では、ケーブルの代わりに棒状のプリント基板を用いることで形状変化のない安定した計測を実現し、その基板上にマイコンチップを実装して周波数計測とシリアル通信を行うことで、様々な機器に接続可能な改良モデルを提案し、その性能評価を行う。

2. 改良型センサモジュール

改良型モジュールの外観を図2に示す。フラットケーブルの代りの棒状のプリント基板には、図3に示した水位と EC 値測定用の二つの発振回路および、Arduino UNO と同じマイコン ATmega328P を実装している。なお、図3の r と c はそれぞれ、養液に浸したセンサ基板の電極間の電気抵抗と、並行な配線パターンによる静電容量を表してい

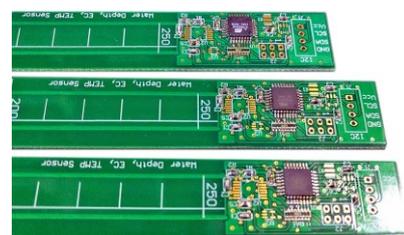


図2 改良型センサモジュール

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications

² 有限会社トゥロッシュ
TROCHE Co., Ltd.

る。マイコンとは直接シリアル通信が可能で、多くの無線モジュールはトランスペアレントモードを用意しているため、シリアルに流したデータの無線通信も容易である。また、I²C 通信にも対応している。電源入力には 3.3V と 5V に対応し、これをセンサ用の内部電源 2.5V に降圧することで、いずれの入力電圧でもセンサの特性が変化しないようにしている。

EC 値と水位はそれぞれの発振回路で繰り返しのパルス波形に変換され、その単位時間中 (1ms, 2ms, 4ms, 8ms のいずれかを設定) のパルスの数を 16bit タイマでカウントする。また、そのカウント数は 8bit タイマで定期的に割込みをかけて取得する。マイコンは 16MHz で動作しており、1kHz~8MHz の波形の観測が可能である。

基板先端には EC 測定用の電極と水温測定用の温度センサを、根元には 3 インバータ方式の発振回路とマイコン、そしてケーブルコネクタを実装した。温度センサの測定値はアナログ出力のため、マイコンのアナログリファレンスにもセンサ電源と同じ 2.5V を印加している。また、EC 値と水位の発振周波数は振幅 2.5V のパルスとして出力されるため、それをカウントするマイコン (電源電圧 2.5V または 3.3V) の入力レベルシフト用の 2 入力 XOR ゲート X₅ を配置している。X₅ には XOR ゲート X₁ と X₂ を通じて二つの発振回路の出力が入力されるが、X₁ と X₂ はマイコンの制御出力 PC0 と PC1 をそれぞれ 0 とすることで、発振を停止することができる。これによって測定時には両者を切り替え、またアイドル時には両者を停止させて消費電力の削減を図っている。

3. 性能評価実験

3.1 EC センサ

EC センサの発振周波数の計測は、事前に市販の EC 計を用いて EC 値が 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 mS/cm の 7 種類の養液を作って冷蔵庫で冷却しておいた。それを図 4 のようにプラスチック容器に入れ、ヒーターで加熱しながら 5~30℃ の範囲を 5℃ 刻みで、発振回路の動作周波数を 50 回連続して計測して平均を求めた。電気伝導度は養液の温度の上昇につれて大きくなるが、養液の濃度が変わるわけではない。植物にとって重要なのは濃度で電気伝導度ではないので、EC 計で表示する電気伝導度は 25℃ を基準としている。そこでまず、25℃ の養液の EC 値と発振周波数の関係を図 5 に示す。なお図の実線は、測定値を基に発振周波数の関係式のパラメータを求め、その式から計算したものである。これについて次に述べる。

図 3 において、PC0=1 として EC センサ用の発振回路を動作させたときの等価回路は図 6 の 3 インバータ発振回路となる。この回路の周波数は式(1)で与えられる。

$$f_{EC} = \frac{1}{2.2C_1(r+R_1)} \quad (1)$$

r は電極間の養液の抵抗なので、電気伝導率 EC (S/cm) は次式で表される。

$$EC = \frac{1}{r} = \frac{1}{\frac{1}{2.2C_1f_{EC}} - R_1} \quad (2)$$

この式と実測値との差の自乗平均が最も小さくなるパラメータとして、 $C_1=1.780 \times 10^{-12}$, $R_1=717$ が得られた。

次に EC 値の温度特性について検討する。図 7 は温度と周波数の関係を、図 8 は式(2)を用いて周波数を EC 値に変換したものである。このグラフを温度に依存せずに一定の値に補正するため、25℃ を基準として値を温度変化に対し

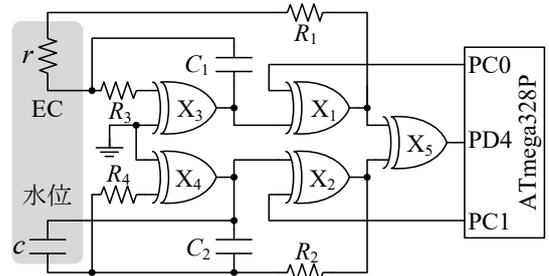


図 3 改良型センサモジュールの発振回路

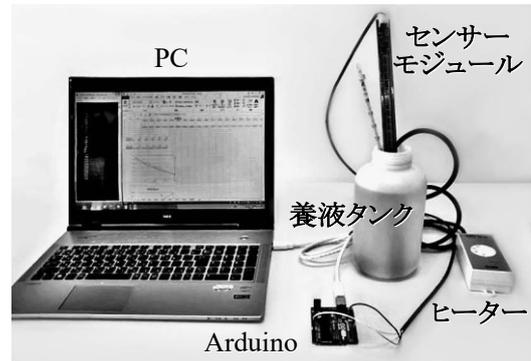


図 4 実験の様子

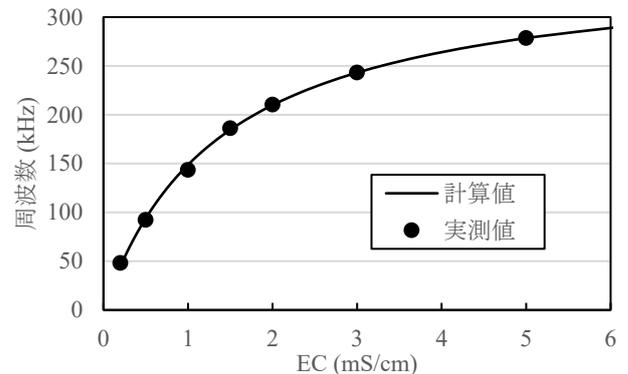


図 5 EC 値に対する発振周波数 (25℃) 縦横軸逆

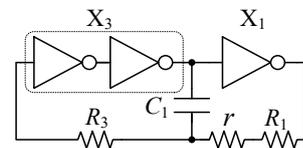


図 6 EC センサの等価回路

て動作周波数を補正する次式を考える。

$$f'_{EC} = f_{EC} + (T - 25) \cdot X \quad (3)$$

この X は定数ではなく周波数に依存するため、実験データからこれを近似する 2 次式を最小二乗法により求めたのが式(4)で、この補正した周波数 f'_{EC} から算出した EC 値のグラフが図 9 である。

$$X = -82.76 \times \left(\frac{f_{EC} - 20224}{37922} \right)^2 + 822.3 \times \frac{f_{EC} - 20224}{37922} + 168.1 \quad (4)$$

温度変化に対して、比較的安定した値を示しているが、EC=5 ms/cm で ±4%、EC=0.2 ms/cm で ±15% 程度の誤差があり、補正式の見直しと、それに必要なより精度の高い実験データの取得が課題である。

3.2 水位センサ

水位センサは、基板が養液に浸かることで生じる配線パターン間の容量 C の変化を、発振回路の周波数として検出

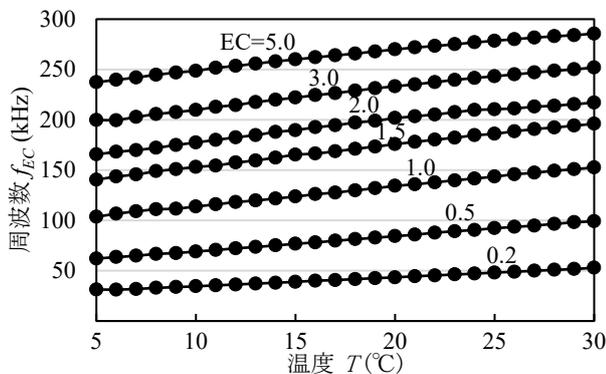


図 7 EC センサの発振周波数の温度特性

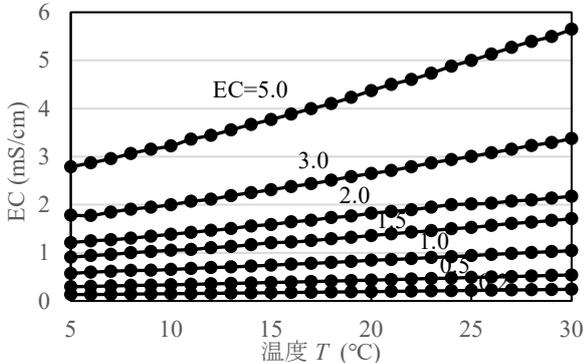


図 8 温度補正前の EC 値

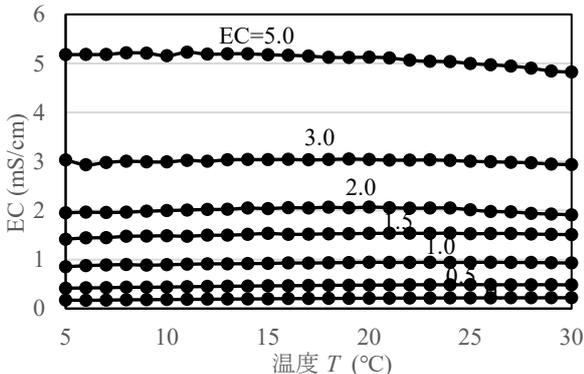


図 9 温度補正後の EC 値

する。図 11 は EC 値 3.0 mS/cm の養液に浸けるセンサ基板の長さを 0, 5, 10, 15, 20cm と変化させたときの、発振周波数 f_{WL} を 50 回連続して計測した平均値を示している。図 3 の下側の水位用の発振回路を、制御信号 PC1=1 として動作させたときの等価回路は図 10 のようになる。この 3 インバータ発振回路の周波数 f_{WL} は次式で与えられる。

$$f_{WL} = \frac{1}{2.2(c + C_2)R_2} \quad (5)$$

従って基板とコンデンサを合わせた静電容量 C_{WL} は次式となる。

$$C_{WL} = c + C_2 = \frac{1}{2.2f_{WL}R_2} \quad (6)$$

この式で計測した周波数を変換してプロットしたのが図 12 のグラフである。グラフは直線性を有しているため、

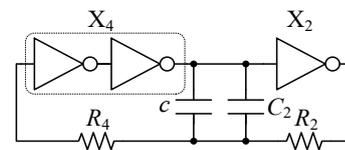


図 10 水位センサの等価回路

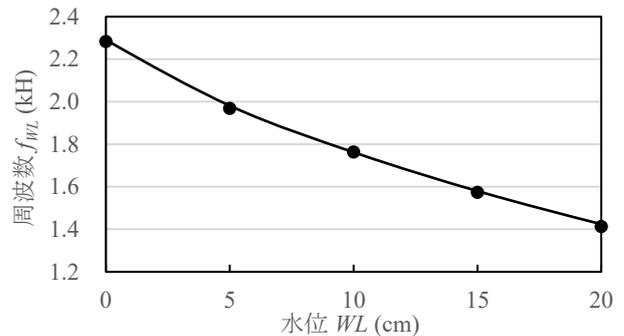


図 11 水位に対する発振周波数

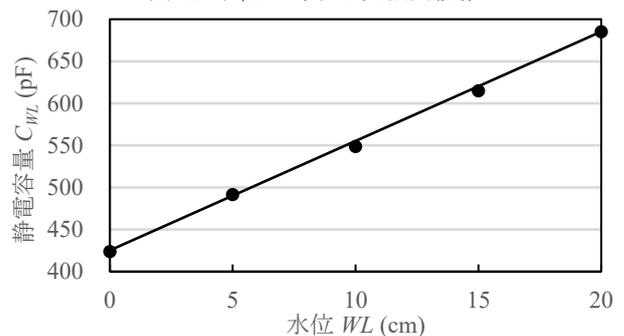


図 12 水位に対する静電容量

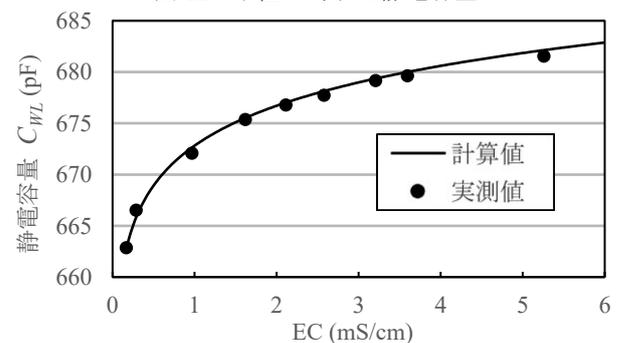


図 13 水位 20cm における EC 値に対する静電容量

任意の 2 点から水位の変換式を作ることができる。EC 値によって直線の傾きが異なるが、切片となる水位 0cm の容量 C_{WL0} は EC 値の影響を受けない定数である。そこで、水位を 20cm に固定し、EC を変化させながら発振周波数を測定し、容量 C_{WL20} を式(7)で求めたのが図 13 のグラフのプロットである。なお、ここで EC 値は温度補正されている値である。 C_{WL20} は EC 値と共に増加しやがて飽和するが、様々な関数による近似を試みたところ、図 13 に実線で示した自然対数を用いた次式が最もよく一致した。

$$C_{WL20} \cong (5.375 \times \ln(EC) + 672.7) \times 10^{-12} \quad (7)$$

これら結果から水位の変換式を導出する。水位 WL と静電容量 C_{WL} は比例関係にあり、2 点($C_{WL0}, 0$), ($C_{WL20}, 20$)を通るため、直線の方程式から次式が成り立つ。

$$WL = 20 \times \frac{C_{WL} - C_{WL0}}{C_{WL20} - C_{WL0}} \quad (8)$$

C_{WL0} と C_{WL20} を定数とし、式(8)に式(6)を代入すると、

$$WL = 20 \times \frac{\frac{1}{2.2f_{WL}R_2} - C_{WL0}}{C_{WL20} - C_{WL0}} \quad (9)$$

と最終的な水位センサの発振周波数 f_{WL} と水位 WL の変換式が得られる。

4. むすび

本論文では、都市の生活の様々な場所で個人が栽培を楽しむサービス産業としての農業を実現するため、水耕栽培用センサモジュールの開発を行った。EC 値と水位をシンプルな発振回路で計測し、一つのモジュールに集約してコストを低減した。その原理は、細長い棒状のプリント基板を養液に付け、その電極の静電容量と電気抵抗の変化を発振周波数として計測するものである。プロトタイプはマイコンボード Arduino 専用開発したが、今回の改良型は Arduino と同じマイコン ATmega328P を基板上に実装し、シリアル通信と PC インタフェースもサポートした。発振周波数の温度および液肥濃度による変化を測定し、実測データにフィットする補正式を導出した。

今回の実験は室内の安定した環境で、水温もヒーターの性能から 5~30℃の範囲で計測を行った。しかし、実際の使用環境はベランダや屋上などより温度変化が激しく、またポンプの駆動等により水位も常時変化する屋外であることから、フィールドでの継続した性能評価および耐久性試験が必要である。また、素子や基盤の静電容量や電気抵抗にはばらつきがあるため、個々に補正のパラメータを算出する必要があるが、標準養液に浸すことで自動的に校正を行うファームウェアの開発も今後の課題である。

現在、図 14 の小型水耕栽培装置の開発と事業化を進めており、本論文のセンサモジュールをさらに改良したものを実装する予定である。



図 14 開発中の小型水耕栽培装置

参考文献

- 1) 農林水産省, “農業分野におけるICT等の先進技術の活用への推進”, 未来投資会議構造改革徹底推進会合「ローカルアベノミクスの深化」会合(農業)(第5回), 配布資料, 2017年2月6日.
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishin_kaigo_dai5/siryoub6.pdf
- 2) 天野英二郎, “スマート農業の推進 — ICT・ロボット等を活用した農業の取組 —”, 参議院事務局企画調整室, 立法と調査, no.359, pp.44-57, 2014年12月.
http://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/bac_knumber/2014pdf/20141209044.pdf
- 3) W. S. Lee, "Sensing technologies for precision specialty crop production," Computers and Electronics in Agriculture, Elsevier, vol. 4, no. 1, pp. 2-33, 2010.
- 4) 塩谷剛, “農業分野における ICT 活用の現状について —センサーネットワーク分野参入企業の事例を中心に—”, 機械振興協会 機械情報産業カレント分析レポート, No.115, 2016年3月.
http://www.jspmi.or.jp/system/file/2/83/current_115.pdf
- 5) 西村知紘, 奥山雄司, 佐藤証, “高精度で低コストな水耕栽培用センサモジュールの開発”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, 1C-1, pp.61-65, 2016年7月.