

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

西村知紘¹ 奥山雄司² 佐藤証¹

概要:近年のIoTやセンサ技術を用いた農業が大きく注目されている。しかし大企業や国のプロジェクトによる大規模圃場や植物工場での利用がほとんどで、そのようなシステムの導入コストは数百~数千万円と非常に高価である。日本の農業を支える個人農家では導入が極めて困難である。また、安価なマイコンプラットフォームやセンサモジュールが普及し、それらを植物栽培に用いた事例の紹介もあるが、機能や精度が十分でなく実用レベルには達していないのが現状である。そこで本論文では、本格的な水耕栽培施設での利用を目的に開発した高い拡張性を備えた高精度で低コストなセンサモジュールの構成を示し、その特性評価を行なう。

Development of a High-Accuracy and Low-Cost Sensor Module for Hydroponic System

Tomohiro Nishimura¹ Yuji Okuyama² Akashi Satoh¹

1. はじめに

モノがインターネットに接続され、互いに通信し合う IoT (Internet of Things) が近年大きな注目を集めており、個人でも手軽に扱える Arduino [1]や RaspberryPi [2]などの IoT 用マイコンプラットフォームや各種センサが市場に投入されている。特に農業 ICT 向けの通信機能付きセンサモジュールが数多く販売されているが、それらの多くが大企業や国のプロジェクトによる大規模圃場や植物工場で利用されている [3] [4] [5]ため、モジュール単体でも数十万円と高価で、大規模システムになると数百万~数千万円になることも珍しくない。従って、一般ユースだけでなく、日本の農業を支える個人農家への導入も極めて困難である。

我々は昨年、Arduino をベースに市販のセンサモジュールや無線モジュールを実装したセンサモジュールを開発し(図 1)、トマトを中心とする水耕栽培装置(図 2)で栽培環境のモニター実験を行った [6]。そして、そこで得た知見を基に、高い精度と拡張性を有しながら低コスト化を図ったセンサモジュールを開発した。個人ユースだけでなく、現在実験中の本格的な施設(図 3)での利用にも耐えうる性能を有している。本研究ではそのセンサモジュールの構成を示し、特性の評価結果について考察する。



図 1 無線モジュールを実装したセンサモジュール



図 2 トマトの水耕栽培



図 3 実験中の大規模水耕栽培施設

2. センサモジュール

水耕栽培において必要な情報は、液肥濃度の指標としての電気伝導度 (EC: Elector Conductivity), 水位, 水温, 気温, 湿度, 照度等である。その中でも養液タンク中の EC 値, 水位, 水温は、植物の発育状況のモニターに最も重要なパラメータであるだけでなく、上記の屋外の水耕栽培施設で制御可能な値でもある。今回開発した図 4 の Arduino 用のセンサモジュールは、

1 電気通信大学 情報・ネットワーク工学専攻

2 株式会社トゥロッシュ

養液の情報取得において次の特徴を有している。

- EC 値, 水位, 水温の計測を 1 センサモジュールに集約
- 液肥タンクの形状や大きさに影響を受けない
- 安価なリボンケーブルによる低コスト化

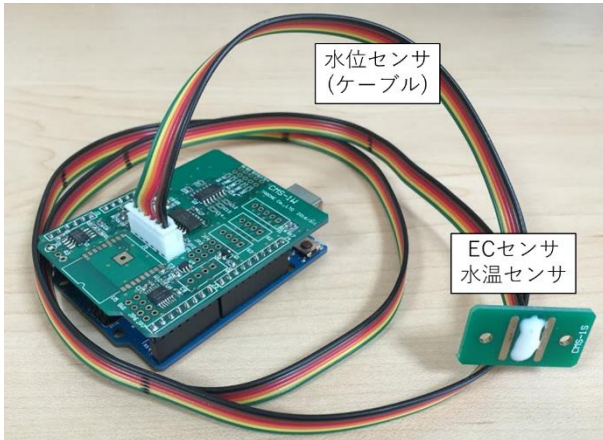


図 4 開発したセンサモジュール

図 5 に本センサモジュールの回路図を示す。ケーブルの先端には、水温計測用の温度センサと EC 計測用の電極があり、養液の濃度によって電極間の電気抵抗が変化する。それによって変化する発振周の周波数を EC 値に変換している。また、水位はリボンケーブルの養液に浸かっている長さによって静電容量が変化する。それをやはり発振回路の周波数変化として計測する。周波数の計測には Arduino に用いられているマイコン ATmega328P の 16bit タイマ/カウンタを用いる。しかし 16bit タイマ/カウンタは 1 つしかないため、EC 値と水位で切り替えな

がら計測を行っている。ところで、EC 値測定のためにケーブル先端の電極間に直流を流し続けると電極が電気分解されてしまうため、交流を用いた。

2.1 EC センサ

EC センサを浸した食塩水の濃度を変えながら、センサ出力（周波数）がどのように変化するかを調べた。またその周波数と、図 6 のおよび表 1 に示した EC 計で測定した値との関係を示したのが図 7 のグラフである。



図 6 使用した EC 計測器

表 1 EC 計の仕様

製品型番	MD-TDS-EC
測定レンジ[uS/cm]	0-9990
精度	±2.0%
測定レンジ(水温)[°C]	0.1-80.0

EC センサの発振周波数 f_{EC} は、図 5 に示した回路中の C_8, R_4 および、電極間の養液の電気抵抗 r を用いて以下の式で表せる。

$$f_{EC} = \frac{1}{2.2C_8(r+R_4)} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

式(1)を変形して、電極間の養液の電気抵抗 r は

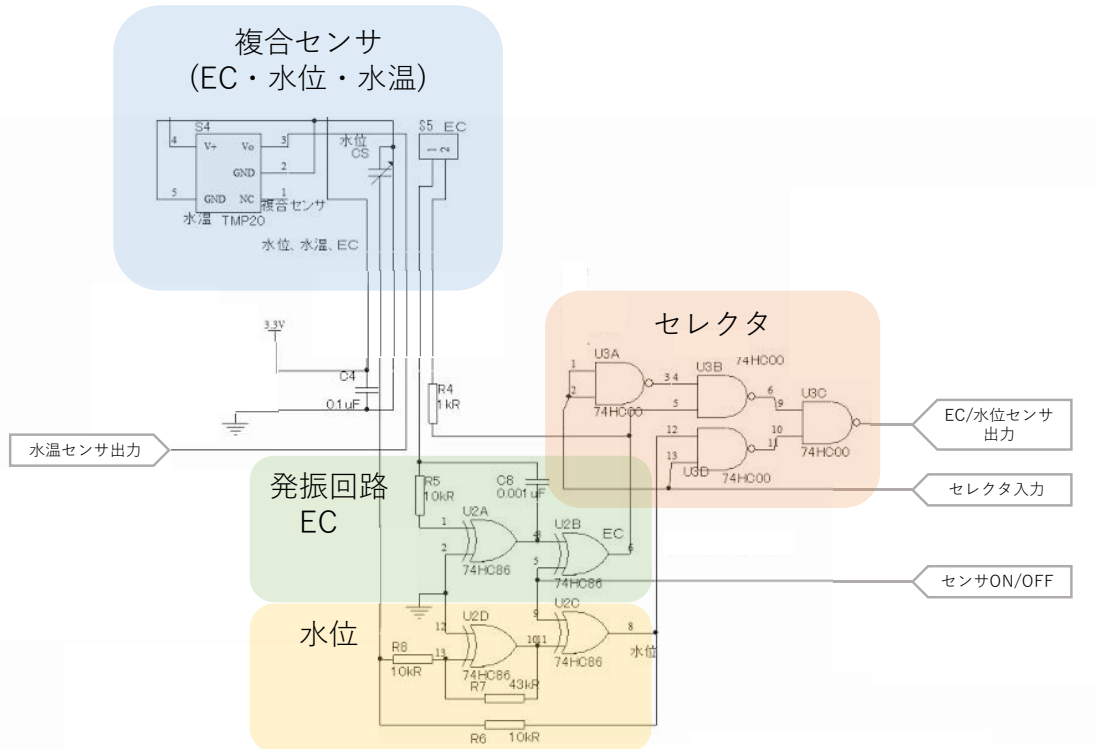


図 5 センサモジュール回路

$$r = \frac{1}{2.2C_8f_{EC}} - R_4 \quad [\Omega] \quad (2)$$

となり、最終的に電気抵抗の逆数である EC 値は次式となる。

$$EC = \frac{1}{\frac{1}{2.2C_8f_{EC}} - R_4} \quad [S/cm] \quad (3)$$

ただし C_8, R_4 共に表記されている値と実際の値との間に誤差が生じているため、これらを調整する必要がある。図 6 の結果は EC の実測値と計算値の誤差が最も小さくなるように C_8, R_4 の値を調整しており、 $C_8 = 3.52 \times 10^{-8}$, $R_4 = 735$ のときに誤差が最小となった。そのときの誤差を表 2 に示す。

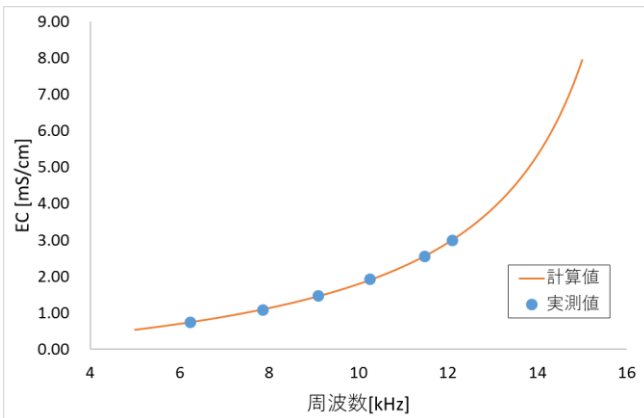


図 7 EC センサの特性

表 2 EC センサの誤差

実測値 [mS/cm]	計算値 [mS/cm]	誤差率 [%]
0.75	0.75	0.082
1.096	1.10	0.381
1.482	1.46	1.355
1.942	1.91	1.885
2.564	2.57	0.044
3.002	3.00	0.006

EC 値の誤差が 1.5-2.0[mS/cm] 付近で大きくなっているが、これは電極面と容器の底との距離が原因だと考えられる。電極間を流れる電流は図 8 のように、電極間の距離が大きいほど濃度を計測できる領域が大きくなる。しかし、測定に必要な空間も大きくなるため、電極面と容器の底の距離が不十分だと、底を流れる電流に変化が生じて発振周波数に変化してしまう。今回は電極面を容器の底から 3cm 離して計測を行ったが、EC 値 1.5-2.0[mS/cm] 付近の計測時に電極面の位置が動いてしまったと考えられる。

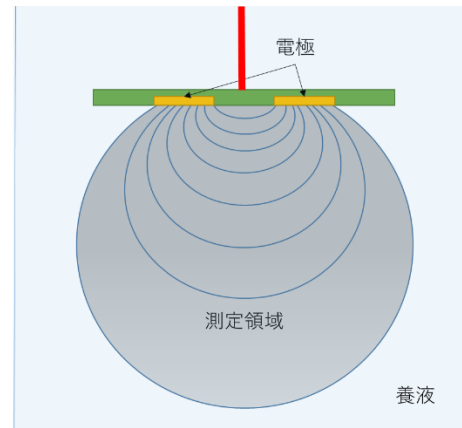


図 7 電極間を流れる電流

また、電極間に電流を流す時間が 500ms 以上になると養液の電気抵抗が変化して、発振周波数に影響を与えてしまうことが実験で判明した。この問題は周波数カウンタがパルスのカウントを行う時間であるゲートタイムを短く設定することで解決できるが、ゲートタイムを半分にするとセンサの分解能も半分になってしまうことから、アプリケーションの仕様に応じてトレードオフ点を決める必要がある。

2.2 水位センサ

水位センサの特性を評価するために、図 8 のように食塩水を入れたペットボトル容器内にケーブルを浸し、液体中のケーブル長を変化させた時のセンサの値（周波数）からセンサの特性および変換式を求めた。図 9 に水位センサの特性を示す。横軸は水位、縦軸は発振周波数を示している。グラフから分かるように、同じ水位でも EC 値によって発振周波数が異なっている。したがって水位センサは EC 値による補正が必要であることがわかる。



図 8 水位センサの特性評価実験

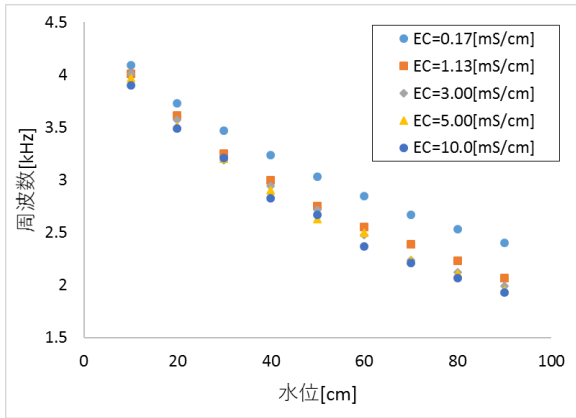


図9 水位センサの特性

水位センサはケーブルが養液に浸かることで生じる静電容量の変化を利用している。そこで、周波数と水位の変換を行うために、まずケーブルの静電容量を求める。水位センサの発振周波数 f_{WL} は、図5に示した回路中の R_6 および、ケーブルの静電容量 C を用いて次式で表せる。

$$f_{WL} = \frac{1}{2.2CR_6} \quad (4)$$

これを変形して。

$$C = \frac{1}{2.2f_{WL}R_6} \quad (5)$$

図10は式(5)より求められたケーブルの静電容量を図示したものである。グラフから各ECにおけるケーブルの容量は線形に増加しており、その切片はECに依らず不変であることがわかる。したがって、ケーブルの静電容量がわかれば水位は容易に算出することができる。

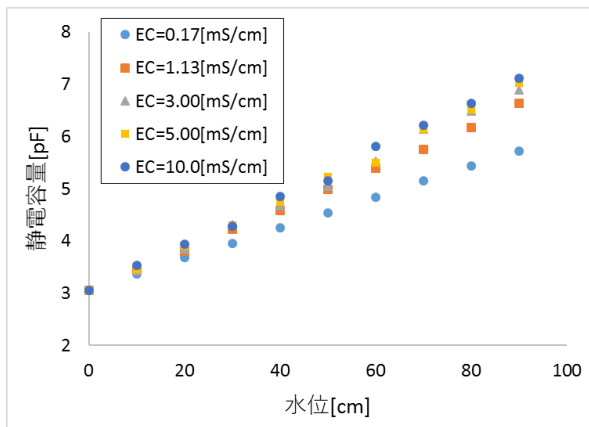


図10 水位による静電容量の変化

ケーブルの静電容量の振る舞いを調べるため、図11のような等価回路に置き換えて考える。回路向かって右側がケーブルの先端、左側が根本となっている。ケーブルの静電容量は、被覆部分の静電容量 C_c と被覆の外側部分の静電容量 C_v の2つの静電容量が直列に接続されたものが最小構成となっており、それらが無数に並列接続されていると考えることができる。

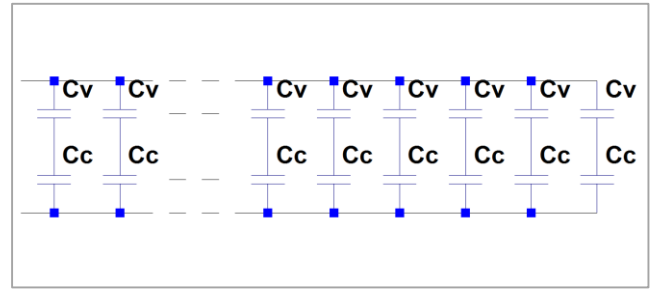


図11 ケーブルの等価回路

C_v はケーブルが養液に浸かることで変化し、変化後の静電容量を C'_v 、ケーブルの長さを L 、水位を x とすると、水位 x におけるケーブルの静電容量 $C(x)$ は次式で表せる。

$$\begin{aligned} C(x) &= \int_0^x \frac{C_c C'_v}{C_c + C'_v} dx + \int_x^L \frac{C_c C_v}{C_c + C_v} dx \\ &= \frac{C_c C'_v}{C_c + C'_v} x + \frac{C_c C_v}{C_c + C_v} (L - x) \\ &= \left(\frac{C_c C'_v}{C_c + C'_v} - \frac{C_c C_v}{C_c + C_v} \right) x + \frac{C_c C_v}{C_c + C_v} L \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\frac{C_c C_v}{C_c + C_v} L$ は水位0cmのときのケーブルの静電容量であるため、式(6)は以下のように書くこともできる。

$$C(x) = \left(\frac{C_c C'_v}{C_c + C'_v} - \frac{C_c C_v}{C_c + C_v} \right) x + C(0) \quad (7)$$

図10から、EC値が高くなるに従ってケーブルの静電容量は飽和していくことがわかる。そこで、飽和時の値としてEC値10[mS/cm]のときの静電容量を用いて、EC値の影響が顕著な水位90cm時の各EC値におけるケーブルの静電容量をプロットしたものが図12である。横軸はEC値、縦軸はケーブルの静電容量で、グラフ上の点は実測値、曲線はEC値から算出したケーブルの静電容量を表している。

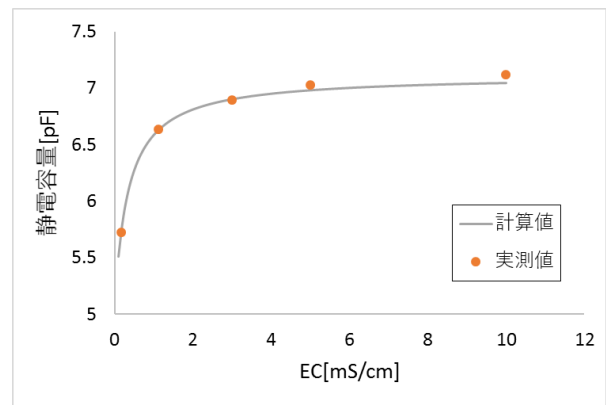


図12 ECによる静電容量の変化

EC 値の上昇とともにケーブルの静電容量は飽和することから、EC 値 e と静電容量 C の関係式 $C(e)$ を飽和時の静電容量 C_{sat} とパラメータ α, β, γ を用いて次式と仮定した。

$$C(e) = \left(1 - \frac{\alpha}{\beta \cdot e + \gamma}\right) C_{sat} \quad (8)$$

各観測点での式(8)から求めた静電容量と実測値の誤差が最も小さくなるようにパラメータを変化させたところ、 $\alpha = 9.81, \beta = 0.0981, \gamma = 33.6$ のときに最も誤差が小さくなった。各観測点における誤差を表 3 にまとめる。

表 3 水位センサの誤差

EC[mS/cm]	計算値[pF]	実測値[pF]	誤差率[%]
0.17	5.73	5.73	1.63E-05
1.13	6.63	6.63	7.73E-05
3	6.90	6.89	1.15E-01
5	6.98	7.03	6.91E-01
10	7.05	7.12	9.67E-01

表 3 から、EC 値が高くなるに従って誤差も大きくなるのがわかる。しかしながら、通常の栽培で使用する養液濃度である 1.0-2.0[mS/cm] の範囲であれば、非常に高い精度で EC 値から $C(x \neq 0)$ の値を求めることが出来ている。これにより $C(0)$ と $C(x \neq 0)$ の 2 点が求められ、ケーブルの静電容量と EC 値から水位の算出が可能になった。

3. まとめ

水耕栽培において重要な養液濃度と養液タンクの水位の情報を取得する EC センサおよび水位センサの開発を行い、高い精度での動作を確認した。

EC センサは 1.5-2.0[mS/cm] の範囲で最大 1.8% の誤差が生じているものの、その他の領域では 1% 未満を実現している。今後、電極部分の改良を行うことでさらなる精度向上も期待できる。水位センサに関しては、静電容量が EC 値の影響を受けるため、EC 値による補正式を作成した。ケーブルの静電容量のモデル化を簡易的に行ったにも関わらず、実用的な EC 値の範囲においては 0.1% 以下の誤差で線形に変化するケーブルの静電容量の傾きを求めることができたため、非常に高い精度で水位を算出することができる。

4. おわりに

水耕栽培用センサモジュールのプロトタイプを作成し、センサの特性評価および周波数からの計算式の作成を行った。その結果、EC 値と水位は実用的な範囲を十分な精度で計測できることが確かめられた。

また、実験を通じて幾つか改善点も見つかっている。EC センサに関しては、電極の設計を見直すことでより安定した計測が可能になる。また、EC 値は水温の影響を受けることがわかっている。本センサモジュールの電極部にも温度

センサが搭載されているため、水温による EC 値の補正も必要となる。水位センサに関しては、ケーブルの静電容量モデルを解析し、より正確なモデルを構築できれば EC 値が高くなった時の精度が向上すると考えられる。

その他にも、回路上には照度センサや Wi-Fi モジュール等も搭載しており、これらのキャリブレーションも順次行っていく予定である。

5. 参考文献

- [1] “Arduino - Home,” 11 5 2016. [オンライン]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [2] “Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi,” 11 5 2016. [オンライン]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>.
- [3] 総務省, “農業における ICT 活用事例,” 2014. [オンライン]. Available: <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc142320.html>.
- [4] 農林水産省食料産業局新規事業創出課, “AI 農業の取り組みについて,” 5 2012. [オンライン]. Available: http://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/sosyutu/aisystem/pdf/ai_torikumi.pdf.
- [5] 農林水産省食料産業局知的財産課, “ICT 農業の現状とこれから,” 11 2015. [オンライン]. Available: http://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/sosyutu/aisystem/pdf/ict_ai.pdf.
- [6] 西村知紘, 佐藤証, “マイコン制御を用いた水耕栽培システムの開発,” 2015.