

スマート都市農業のための水耕栽培装置用センサモジュール

田中天翔¹ 佐藤証¹

概要：スマートフォンで遠隔管理を行う個人用の小型水耕栽培装置の製品化に向け、小型化と液肥濃度測定回路の改良を行ったセンサモジュールを開発した。濃度測定時の電力を抑えて電極の劣化を防ぎ、また AD コンバータの特性評価による回路パラメータの設定と、3 次曲面による近似では重み付き最小二乗法を用いることで、精度の向上を図った。その結果、濃度測定範囲 0.25~3.5mS/cm において $\pm 0.8\%f.s$ という高い性能が得られた。

1. はじめに

我々は、都市のビルの屋上等の空きスペースを利用し、個人や地域コミュニティで楽しむ水耕栽培装置の開発と試験運用を行っている[1][2]。工事用足場パイプや DIY 用のパイプで、図 1 のように苗を誘引するフレームを作って装置を設置するだけで、重い土を入れる必要がないため、2~3 日で施工可能である。また装置は小型のソーラパネルで駆動できるため、水が確保されればどこでもすぐに始められる。また土を使わず害虫が少ないため、無農薬栽培を行っており、図 2 のように小学校の校舎の屋上や病院等にも導入している。



図 1 大学屋上の巣都夫栽培施設



図 2 小学校校舎屋上への設置

都市近郊の農地を活用し、専門の農業従事者が管理を行う都市農業とは異なり、個人の余暇時間として楽しむ栽培

のため、センサやマイコンを用いた管理・監視システムの導入が不可欠である。そこで筆者らは、温湿度、水温、水位、液肥濃度の測定や液肥循環ポンプの制御等の機能を備えた、水耕栽培装置用センサモジュールの開発を続けている[3][4]。本稿では、製品化に向けて大幅な改良を行ったセンサモジュールの機能について述べ、水耕栽培で最も重要な液肥濃度管理機構の精度を評価する。

2. 旧センサモジュール

図 5 に小型水耕栽培装置と、旧型の水耕栽培用センサモジュールや循環ポンプを実装した内部を示す。装置後部の防水ボックスに入れられたセンサモジュールは、図 6 に示すように Arduino と同じ形状の親基板 WeMos D1 R32 に各種センサを有する子基板をスタックしている。両基板の間は、シリアル通信やピンヘッダを介してデータ送受信と制御を行っている。WeMos D1 R32 は Wi-Fi 機能を内蔵した

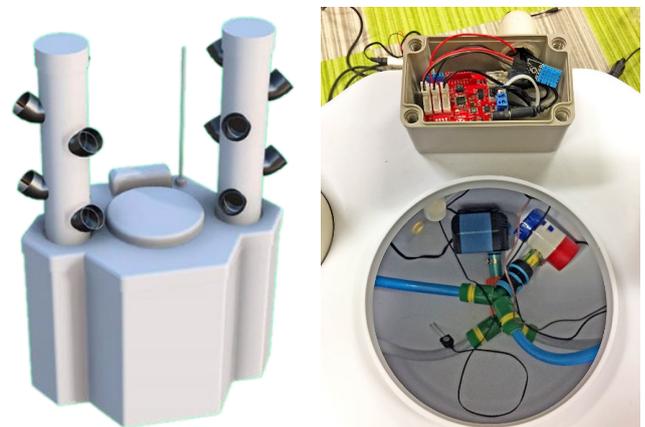


図 3 小型水耕栽培装置(左)とその内部(右)

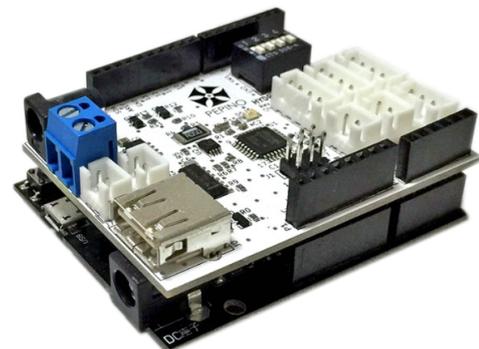


図 4 水耕栽培装置用の旧センサモジュール

¹ 電気通信大学

32 ビットマイコン ESP32-WROOM-32 (以下 ESP32) を有しているが、通信距離が短く、広い屋上に水耕栽培装置を複数台置くときには Wi-Fi の中継器を設置するなどの対応が必要となる。

親基板と子基板の間はシリアル通信を行っているが、子基板のプロセッサ ATmega328P は親基板と異なる独自のクロックで動いており、親基板は Wi-Fi でも通信しているため、時々タイミングが合わずにデータを取りこぼすことがあった。また基板を二階建てとしたため、装置の後部に大きな防水ボックスを置く必要があった。

液肥濃度は通常、溶液に電極を漬け、濃度によって変化する電気伝導度 EC (Electro Conductivity) を測定する。EC 値は溶液が濃いと上がり薄いと下がる。つまり抵抗値は溶液が濃いと下がり、薄いと上がる。また、水温が高いと EC 値は上がり、低いと下がるが、液肥中の肥料成分の割合が変化するわけではない。したがって、水温により EC 値を補正することで液肥濃度が測定できる。水耕栽培において EC 値は液肥濃度と同意で使われるが、基準の 25°C に補正した値を指しており、本稿でも単に EC 値と呼ぶ場合はこの補正した値を意味する。旧モジュールでは、電極間の液肥を抵抗素子とする図 5 のオペアンプ発信回路を組み、その発信周波数と水温から液肥濃度を計測していた。求める EC 値は、周波数と水温を変数とする曲面で表される。これを 3 次曲面によって近似することで、最大誤差を EC 値 0.25~3.5mS/cm の範囲で 8.4% に抑えていた。

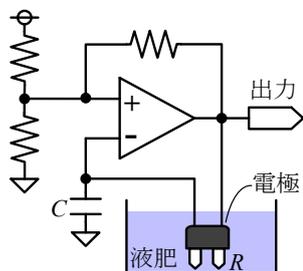


図 5 旧モジュールのオペアンプを用いた液肥濃度センサ

旧センサは電極間に振幅 0~3.3V で、周波数数 kHz の方形波を流していた。流す期間は 10 分にわずか 5 秒程であるが、一か月では計 6 時間にも及ぶ。そのため、3 か月ほどでステンレス電極の表面が図 6 のように劣化し、表面をきれいに研磨しないと正しい EC 値が測定できなくなってしまった。



図 6 表面が劣化したステンレス電極

そこで本論文では、電極の劣化を防止し精度の向上を図った EC センサを開発し、センサ機能と通信・制御機能を一つの基板にして小型化と通信の安定性を実現するモジュ

ールを製作し、その性能評価を行う。

3. 新センサモジュール

図 7 に、今回作成した新センサモジュールの外観を示す。面積は 56mm×70.9mm で、図 4 の WeMos D1 R32 の面積 70×53.3mm よりも一回り大きいだけである。また最も高い部分は DC12V 電源コネクタで、12mm で、これは図 4 の親基板と子基板をスタックしたときの 27mm の半分以下である。なお図 8 のように基板で、センサ、電源、デバッグ用のコネクタを外してケーブルを直接ハンダ付けすることで、高さはわずか 5mm となり、わずかなスペースでもどこでも設置可能である。



図 7 新センサモジュール



図 8 コネクタを外した新センサモジュール

新規板には最新の ESP32-WROOM-32E を搭載し、WeMos D1 R32 では非常に短かった通信距離は、2.4GHz Wi-Fi で 10m 以上が確保されている。液肥濃度、水温、水位、外部ポンプ電流の各センサ用の 2 ピン XH コネクタ×4、拡張用 4 ピン I2C コネクタ×3、デバッグ用 16 ピンヘッダ×2、プログラム用 4 接点 DIP スイッチ、DC12V 入力、12V 水中ポンプ出力、micro USB コネクタ、USB Type B コネクタを持つ。Type B コネクタは通信や電源入力用ではなく、液肥追加用のエアポンプを駆動するためのものである。温湿度センサは SI7006 を持つが、基板上に実装しているのでその周辺の参考程度の値であり、外気を正しく測定したい場合は I2C コネクタにセンサをケーブル接続する必要がある。

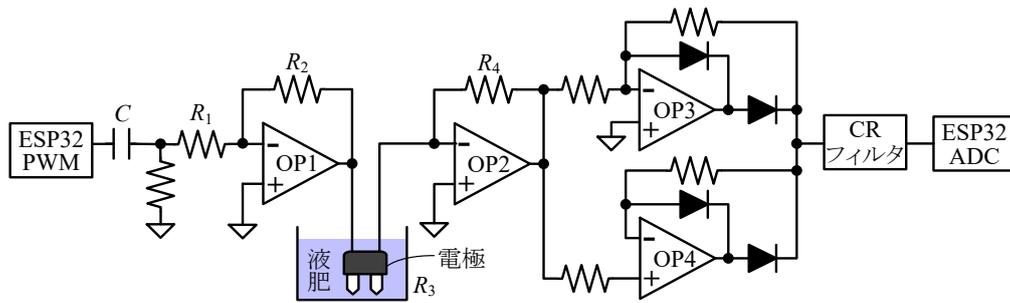


図9 新モジュールの液肥濃度センサ

4. 液肥濃度センサの構成と ADC の校正

旧液肥濃度センサではオペアンプ発信回路の振幅 0~3.3V の信号が、2本の電極の一方に流れ、劣化の要因となっていた。そこで振幅を抑えた交流電流を流すことで電極の劣化を抑える新モジュールの液肥濃度センサ回路を図9に示す。旧センサでは液肥の抵抗 R の変化を発信回路の周波数として測定していたが、新センサでは抵抗 R によって増幅率が変化する反転増幅回路を構成している。

ESP32 の PWM で振幅 0~3.3V、周波数 5KHz、Duty 比 50% の方形波を作り、コンデンサ C による AC カップリングで $\pm 1.65V$ の交流信号に変換する。これをオペアンプ OP1 の反転増幅回路で振幅を $1/8.25 (=R_2/R_1)$ 倍の $\pm 200mV$ に減衰して、二本の電極の一方を通じて液肥中に流す。液肥を通った信号をもう一方の電極で受けて、これを OP2 で増幅する。液肥の抵抗値を R_3 とすると増幅率は $-R_4/R_3$ となり、液肥濃度が高いほど R_3 は下がるので、オペアンプの出力は大きくなる。増幅された OP2 の信号は、OP3 と OP4 による 2 つの理想ダイオード回路（半端整流回路）により、マイナス側の信号が反転されてプラス側と加算される。単純な整流であればダイオードだけでも構成できるが、微小な信号変化を検出するため、入力に対して出力がリニアに変化する理想ダイオード回路を用いた。そして最後に RC ローパスフィルタを通った信号の出力電圧を ESP32 の AD コンバータで測定する。

ところで、ESP32 に内蔵の 12 ビット AD コンバータの入出力特性は直線性が悪いことが広く知られている。図 10 は

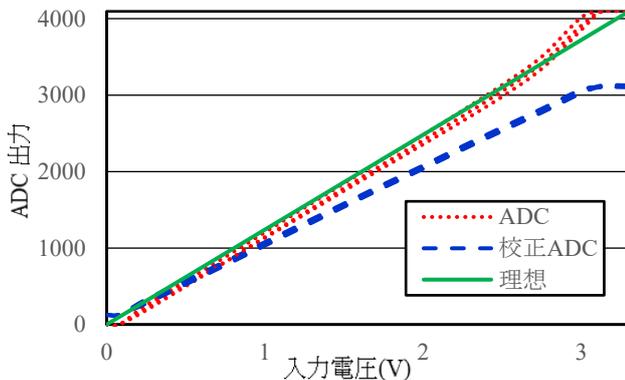


図 10 ESP32 の AD コンバータの入出力特性

今回用いた 3 枚の新センサモジュール上の ESP32-WROOM-32E の、入力電圧 0~3.3V に対する ADC 出力の特性を表したものである。理想的な ADC は緑線のように入力電圧と ADC 出力が原点を通る直線となる。しかしながら、ESP32 の ADC は赤点線のように性能が悪く、特に GND と VDD 付近の非線形性が著しいことが知られている。また個体差によるばらつきも比較的大きい。そのため、あまり知られていないが、ESP32 は出荷時にチップ毎に ADC の個体差データが書き込まれており、それを用いて ADC 出力を校正するライブラリ関数も用意されている。その出力関数（以下、校正 ADC と記す）が図 10 の青破線である。赤点線に比べてばらつきが抑えられ、入力電圧 0.1V~3V の範囲できれいな直線となっている。しかし、GND と VDD 付近は元の ADC が測定できず一定値が出力される。したがって、液肥濃度測定では、この部分のデータを使わないように回路パラメータを調整する必要がある。

ここで、濃度 0.25~3.5ms/cm の液肥に図 9 の新センサに接続した電極を浸けて、校正 ADC 出力をプロットしたのが図 11 のグラフである。液肥の温度は実験を行った部屋の室温 23.1℃と同じである。センサモジュール基板上の図 9 の抵抗 R_4 を 2.0, 2.4, 3.0, 3.9, 5.1, 10 K Ω の 6 種類に替えたときの、6 本の近似曲線を引いている。電極間の液肥の抵抗 R_3 に対してオペアンプ OP2 の増幅率は $-R_4/R_3$ で与えられたので、抵抗 R_4 の値が大きいほどグラフの傾きが大きくなっていることが確認できる。増幅率を低くすると測定範囲の有効桁（ADC のビット数）が少なくなるだけでなく、

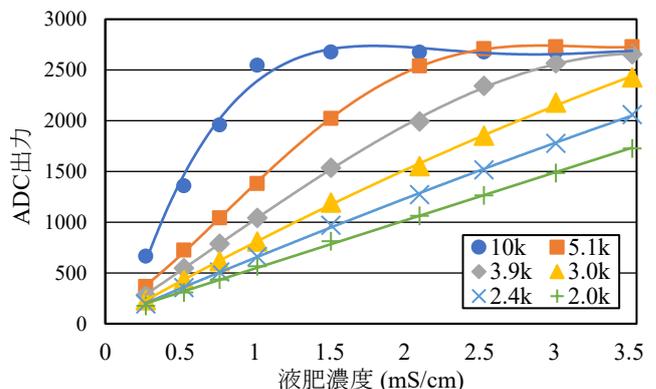


図 11 液肥濃度と ADC 出力の関係

ADC の値が小さい（測定電圧が 0V に近い）ところでの非線形性が著しいため誤差が大きくなってしまふ。しかし増幅率を大きくすると、液肥濃度が低いところで早く測定が頭打ちとなってしまう。通常の栽培における濃度は 0.5~1.5mS/cm 程度であるが、実用上 3.0mS/cm までは測定できる必要がある。そこで、3.5mS/cm まで直線の特性を有し、かつ増幅率の高い 3.0kΩ を抵抗 R_4 に用いることとした。このときの校正 ADC 出力の最大値は、2,500 弱で、測定範囲の上限の 3,000 以下に収まっている。

5. 液肥温度測定

液肥温度の測定には温度によって抵抗値が変化する特性 $10k\Omega \pm 1\%$ 、 $B=3950$ (25°C) のサーミスタを用いた。 R_1 , R_2 を絶対温度 K_1 , K_2 のときの抵抗値とすると、次式が成り立つ。なお、 B は温度の関数となるがほとんど変化しないので定数としても問題はない。

$$R_1 = R_2 e^{B\left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2}\right)}$$

この式を水温 $T_1=(K_1-273.15)$ について解くと次式となる。

$$T_1 = \frac{1}{\frac{\ln(R_1/R_2)}{B} + \frac{1}{T_2 + 273.15}} - 273.15$$

これに $B=3950$, $T_2=25^\circ\text{C}$, $R_2=10k\Omega$ を代入すると、

$$T_1 = \frac{1}{\frac{\ln(R_1/10000)}{3950} + \frac{1}{298.15}} - 273.15$$

が得られる。

センサ基板上では、10kΩ の抵抗とサーミスタで電源 3.3V を分圧し、校正 ADC で測定している。図 10 の 3 基板の実測の平均値から電圧 3.0V で校正 ADC 出力は 3,042 で、そのまま直線を引くと 3.3V は仮想的に 3,346 となる。したがって、温度 T_1 におけるサーミスタの抵抗値 R_1 は、校正 ADC 出力を V_1 とすると次式で与えられる。

$$R_1 = 10000 \times \frac{V_1}{3346 - V_1}$$

6. 液肥濃度算出の 3 次曲面の導出

新センサモジュールを 3 枚用意し、濃度 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 mS/cm の 9 種類の液肥に対して、ADC 出力を測定した。水温によって変化する電気伝導度を標準の 25°C の値に補正するため、各液肥は冷蔵庫で冷やしておき、図 12 のようにペットボトルを半分にした容器に入れ、その周りに熱湯を注いで 5~50°C の範囲で湯煎を行った。計測は自動的に行われ、データは USB を経由して PC にシリアル転送される。

図 13 に 3 枚の基板の各液肥濃度における ADC 出力の対温度特性を示す。EC=2.5mS/cm までは、ADC 出力は温度に対してほぼ直線であるが、2.5mS/cm 以上で非線形性が生じてきている。なお、EC=3.5mS/cm では 15°C 以下で基板のばらつきが大きい、曲線の形から測定誤差と見られる。水



図 12 液肥濃度測定実験の環境

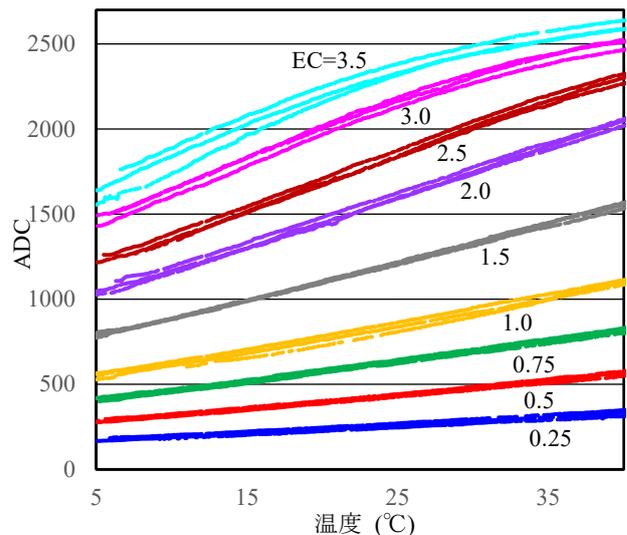


図 13 各液肥に対する ADC 対温度特性

耕栽培の一般的な液肥濃度は 0.5~2.5mS/cm 程度で、大学では常に 1.0mS/cm で栽培しているため、直線近似でも実用上問題はないが、本稿では 3.5mS/cm まで高い精度での濃度測定を行う。

図 13 の 3 枚の基板の ADC 出力の平均を取った後、その ADC の平均出力 V と水温 t を入力に、液肥濃度 EC を出力とする次式の 3 次曲面を二乗誤差が最小となるように求めた。また、この曲面のグラフを図 14 に、各濃度において 3 次曲面から求めた EC 値の最大値と最小値の相対誤差を表 1 に示す。

$$EC = p_{00} + p_{01}V + p_{10}t + p_{02}V^2 + p_{11}tV + p_{20}t^2 + p_{03}V^3 + p_{12}tV^2 + p_{21}Vt^2 + p_{30}t^3 \quad (\text{mS/cm})$$

$$\begin{cases} p_{00} = -2.291 \times 10^{-1} \\ p_{01} = 2.849 \times 10^{-3} \\ p_{10} = -8.579 \times 10^{-4} \\ p_{02} = -5.91 \times 10^{-7} \\ p_{11} = -5.762 \times 10^{-5} \\ p_{20} = 2.267 \times 10^{-4} \\ p_{03} = 2.574 \times 10^{-10} \\ p_{12} = -5.663 \times 10^{-9} \\ p_{21} = 7.721 \times 10^{-7} \\ p_{30} = -6.252 \times 10^{-6} \end{cases}$$

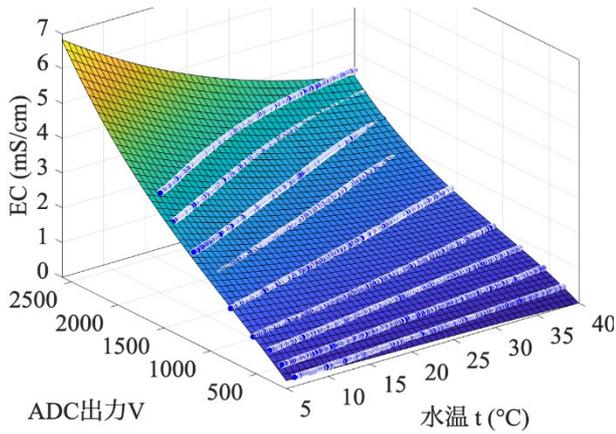


図 14 3 次曲面による EC 値の近似

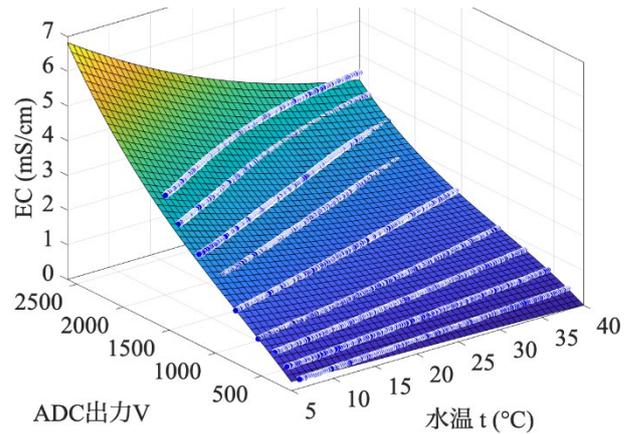


図 15 重み付け 3 次曲面による EC 値の近似

表 1 3 次曲面近似による EC 値の誤差

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
基板 1	最小	0.219	0.454	0.732	0.974	1.45	1.98	2.37	3.02	3.22
	%	-12.3	-9.3	-2.4	-2.6	-3.5	-1.0	-5.15	0.6	-8.1
	最大	0.261	0.515	0.765	1.06	1.58	2.13	2.60	3.13	3.46
基板 2	最小	0.219	0.473	0.759	1.02	1.42	2.03	2.45	3.02	3.43
	%	-12.3	-5.4	1.2	2.1	-5.2	1.3	-2.2	0.8	-2.0
	最大	0.260	0.511	0.784	1.08	1.54	2.15	2.65	3.14	3.68
基板 3	最小	0.204	0.44	0.711	0.992	1.45	1.96	2.37	2.92	3.29
	%	-18.3	-11.9	-5.2	-0.8	-3.4	-2.3	-5.0	-2.6	-6.0
	最大	0.279	0.493	0.756	1.03	1.54	2.09	2.53	3.00	3.54
%	11.6	-1.5	0.8	3.4	2.7	4.3	1.3	-0.1	1.2	

曲面近似による誤差は、低い EC 値ほど顕著であることがわかる。最大誤差は基板 3 の 0.25 mS/cm の液肥に対するもので、曲面近似値 0.204 mS/cm は -0.046 mS/cm 低く、-18.3% となっている。市販の 2~3 万円で購入できる液肥濃度計の精度はその多くが 0~2.0 mS/cm ±2%f.s となっているが、これは測定値に対する % ではなく、測定範囲 0~2.0 mS に対する f.s (full scale) で ±2% × 2.0 mS/cm = ±0.04 mS/cm の誤差があることを意味している。つまり上記 -0.046 mS/cm は製品とほぼ同等の精度を有していることになる。しかしながら、低い EC 値ほど精度が悪いというのは、近似曲面の問題であるため、さらに精度を向上させることを考える。

測定データと 3 次曲面のフィッティングは最小二乗法で行っているが、二乗誤差は EC 値の大小にかかわらず測定データと曲面上の値との差分に対して計算される。そこで、低い EC 値ほど曲面のフィッティングを強くするように、EC 値の逆数によって重み付を行った。3 次曲面の式の形は同じなので、その係数だけを以下に示す。

$$\begin{cases} p_{00} = -1.594 \times 10^{-1} \\ p_{01} = 2.678 \times 10^{-3} \\ p_{10} = -3.187 \times 10^{-3} \\ p_{02} = -5.125 \times 10^{-7} \\ p_{11} = -5.049 \times 10^{-5} \\ p_{20} = 1.514 \times 10^{-4} \\ p_{03} = 2.468 \times 10^{-10} \\ p_{12} = -7.079 \times 10^{-9} \\ p_{21} = 6.982 \times 10^{-7} \\ p_{30} = -3.867 \times 10^{-6} \end{cases}$$

表 2 重み付け 3 次曲面近似による EC 値の誤差

EC (mS/cm)	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
基板 1	最小	0.239	0.473	0.738	0.968	1.45	1.99	2.36	3.01	3.2
	%	-4.5	-5.4	-1.6	-3.3	-3.2	-0.6	-5.6	0.2	-8.7
	最大	0.257	0.515	0.765	1.06	1.57	2.13	2.58	3.10	3.46
基板 2	最小	0.239	0.482	0.762	1.03	1.43	2.03	2.45	3.01	3.39
	%	-4.4	-3.6	1.7	2.8	-4.5	1.7	-2.1	0.24	-3.3
	最大	0.257	0.506	0.782	1.08	1.53	2.14	2.64	3.14	3.69
基板 3	最小	0.230	0.462	0.722	0.99	1.46	1.96	2.38	2.90	3.25
	%	-7.8	-7.6	-3.8	-0.6	-2.8	-2.2	-4.8	-3.4	-7.2
	最大	0.274	0.487	0.749	1.03	1.53	2.08	2.52	3.00	3.55
%	9.5	-2.7	-0.2	3.1	1.9	4.0	0.7	0.1	1.5	

また曲面のグラフを図 14 に、各濃度における EC 値の誤差を表 2 に示す。最大の誤差は基板 3 の 0.25 mS/cm に対する 0.274 mS/cm で、その差分は 0.024 mS/cm (9.5%) であり、市販の液肥濃度計のスペックの 0.04 S/cm に対して半分程度という高い精度が得られた。測定範囲 0.25~3.5 mS/cm の full scale では、プラス側誤差 0.024/3.5 = 0.69%f.s、マイナス側誤差 -0.28/3.5 = -0.8%f.s (基板 3, EC = 0.75 mS/cm) で ±0.8%f.s となる。市販製品の 0~2.0 mS/cm と範囲は異なるが、その ±2%f.s に対して 2.5 倍の精度が得られたと言える。しかしながら、今回の実験に用いたセンサ基板は 3 枚であり、製品化に向けて、より多くのサンプルでの精度評価を行う必要がある。また、筆者らが文献[4]で提案した EC センサの最大誤差は 8.4% で精度は同等であるが、今回は電極の劣化を抑えることを目的に新規の回路を実装しており、ロングラン実験を通じてその効果を検証していきたい。また、電極が多少劣化した場合でも校正を行う機能、さらに液肥の自動追記機構も実装していく予定である。

7. むすび

本稿では、遠隔モニタ・制御機能を有した個人用の小型水耕栽培装置の製品化に向け、小型化と改良を行ったセンサモジュールについて述べ、電極の劣化を抑えた液肥濃度センサの回路を実装した。使用した 32bit マイコン ESP32 の AD コンバータの特性を評価して、液肥濃度センサの回路パラメータを決定し、3 次曲面を用いた近似式を求めて精度評価を行った。その結果、液肥濃度の測定範囲

0.25~3.5mS/cm において各 EC 値での相対誤差±10%以下、
が得られ、測定範囲全体に対する精度は±0.8%f.s となり、
市販のセンサと比較しても高い性能が得られた。

図 16 は開発中の高さ 1m の水耕栽培本体の CAD データ
から作成した 3D イメージであり、3D プリンタで実寸の試
作も進めている。今後、この装置に開発したセンサを実装
して屋外での栽培実験を行い、各機能の動作検証と精度・
信頼性の評価を行う予定である。



図 16 製品化に向けた水耕栽培装置の 3D イメージ

参考文献

- [1] 佐藤研究室: 都市型スマート農業, <<http://satoh.cs.uec.ac.jp/ja/research/hydroponics/index.html>> (参照 2021-05-07).
- [2] A. Satoh: A Hydroponic Planter System to Enable an Urban Agriculture Service Industry, IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2018), OS-ICE(1)-1, Oct. 2018.
- [3] T. Nishimura, Y. Okuyama, A. Matsushita, H. Ikeda, and A. Satoh: A Compact Hardware Design of a Sensor Module for Hydroponics, IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2017), OS-ICE(1)-4, Oct. 2017.
- [4] K. Uehara, H. Ikeda, and A. Satoh: Fertilizer Management System for A Compact Hydroponic Planter, IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2019), REM-4, Oct. 2019.