

排水溝内での内水氾濫検知に向けた静電容量センサの評価 Basic Evaluation of Capacitive Sensors toward Flood Detection in a Drainage

林晃輔[†]
Kosuke Hayashi

近藤亮磨[‡]
Ryoma Kondo

小林亘[§]
Wataru Kobayashi

岩井将行[†]
Masayuki Iwai

1. はじめに

近年、局地的豪雨の頻度が増加傾向にあり、地下空間の氾濫被害が後を絶たないため、その対策が求められている [1]。交通機関や、商業施設、居住施設が存在する地下空間で氾濫が発生すると、人の安全のみならず、商品や高価な機器等の財産、交通機関麻痺による都市機能への被害が発生しうる。そのような地下空間は入り組んでいるため、低コストで細やかに氾濫を検知する仕組みが必要である。また、そのような施設は多くの利用者が存在するため、氾濫検知のためのセンサノードは目立たない場所への設置が望まれている。以上のことから、世の中に普遍的に存在する排水溝内にセンサノードを置いて安定的に氾濫を検知する仕組みが検討されている。水を検知や水位を計測するセンサは、いくつか存在するが、排水溝内で氾濫を検知する用途に適したセンサを明らかにする必要がある。

そこで我々は、静電容量方式の水分検知センサの排水溝内における氾濫検知への適用を目指し、安価な Arduino マイコンのタッチセンサライブラリを応用し水面とセンサの間に生じる静電容量を計測可能な、防水非接触型水検知無線センサノードを試作した。本論文では、これを用いて水位変化によって水面とセンサの間に存在する静電容量が、どのように変化するかを明らかにする。

2. 関連研究

水検知の関連研究では、TDR (Time Domain Reflectometry) 方式 [2] が存在する。これは主に土壌の誘電率から水分量を推定する技術である。また、単純に 2 つの電極を用いて水によって短絡することで水を検知するものも存在する [3][4]。これらはセンサ部分が直接水に接触するため、長期間の運用によって精度が劣化する懸念がある。

また、水圧によって水位を計測する静水圧方式 [5] も存在するが、排水溝内においては水流や大気圧による影響を補正する必要がある。

ダムや河川の水位計測には、水面にフロート (浮き) を設置し、液体の浮力によって上下することで、水位を検知する方法が用いられている [6][7]。この方式では、液体の粘性が強い場合、計測が難しいほか、設置のコストが高い。

光ファイバにエッチングを施して水に沈めることで、屈折率の違いから水位を計測する方式も存在する [8]。これは非常に高感度で計測できるだけでなく爆発性の

危険性のある液体でも安全に計測が可能であるが、コストが高いほか汚水によるセンサ部分の汚れで精度が劣化する危険性がある。

以上のような、水に接触するセンサを排水溝内に適用すると、排水を妨げる恐れもある。

タンク内での水位計測には、設置が容易で高精度な超音波方式の水位センサが一般的に用いられている [9]。しかし、超音波センサは防水加工することが難しいため、水没によって故障する。これを側溝内に設置した場合、氾濫によって水没する危険性があり、安定的に運用することは難しい。

静電容量を計測することで水位を計測する方法は、非接触かつ安価に実装できるため、様々なものが提案されているが、タンクや配管等の容器の側面から水の動きが一定で安定した水面を計測するものがほとんどである [10][11][12][13]。そのため、これを用いて排水溝内において氾濫を検知するためには、検討の余地がある。

3. 防水非接触型水検知無線センサノード

排水溝内の内水氾濫検知に向けて、排水溝の底への設置と比較して排水処理を妨げず、排水溝のコンクリートへの埋め込みと比較して設置が容易であることから、排水溝の蓋の裏面にセンサノードを設置し、センサノードの銅テープと水面の間に生じる静電容量を計測することで水位を計測する防水非接触型水検知無線センサノードを開発した。センサデータ計測用マイコンには、3.3V 駆動の Arduino Pro mini (以下、Arduino) を使用し、無線通信デバイスとして TWELITE DIP を使用した。電池から Arduino へ安定して 3.3V を出力するための DC/DC コンバータとして、秋月電気通商製 StepUP DIP 3.3V タイプ Ver2 を使用した。また、静電容量の計測には Arduino の静電容量式タッチセンサライブラリである Capacitive Sensing ライブラリ [14] を応用した。このノードの回路図を図 1 に示す。Receive pin と Send pin の間に銅テープを接続することで、銅テープと水面の間に生じた静電容量によって、Receive pin と Send pin 間の電圧に変化が生じる。これによって水面との間に生じた静電容量を計測できる。さらに、銅テープとコンデンサを並列に接続することで、コンデンサの容量から比を用いて銅テープと水面の間に生じた静電容量を計算する。

Capacitive Sensing ライブラリのドキュメントに従い、抵抗には 1M Ω 以上の十分に大きな値のものを使用し、コンデンサは任意の値とした。Arduino の GND pin から、30 \times 50 \times 1mm 程度のアルミテープに接続し、そのアルミテープ全体を紙で覆って絶縁することでアース接続を行った。

開発したノードの概要を図 2 に示す。ノードケースには、防水性に優れていて、コンパクトで設置に支障

[†]東京電機大学情報メディア学科, Tokyo Denki University, Department of Information Systems and Multimedia Design

[‡]東京大学先端科学技術研究センター, The University of Tokyo, Research Center for Advanced Science and Technology

[§]東京電機大学研究推進社会連携センター, Tokyo Denki University, Center for Research and Collaboration

をきたさない、タカチ製 BCAP091207T を使用した。図ではケースの蓋が下向きになっており、ケース蓋の内側に銅テープを貼った。センサにケーブルなどが触れ、値に誤差が生じてしまうことを防ぐため、センサの上に厚さ 1cm のゴム板を設置した。回路と電池ケース内部の写真を図 3 の (a)、(b) に示す。

静電容量は、Capacitive Sensing ライブラリの `capacitiveSensorRaw` メソッドで得られるセンサ値から計算することができる。リファレンスおよびソースコードより、センサ値は式 (1) で定義されている。ただし k は実装によって異なる任意の係数、 S はサンプリングレート、 $R[\Omega]$ は銅テープに直列で繋がる抵抗の値、 $C[F]$ は銅テープに並列で繋がるコンデンサの容量、 $x_i[F]$ は銅テープと水面の間に生じた静電容量である。

$$(\text{センサ値}) = \sum_{i=1}^S kR(C + x_i) \quad (1)$$

`capacitiveSensorRaw` メソッドでは、値をより正確に計測するため、引数として指定されるサンプリングレートの回数だけ処理を繰り返し、その総和をセンサ値とする。このため、サンプリングレートを高く設定するほど、センサ値は高くなり、静電容量センサとしての分解能は向上する。また、同様に抵抗の値が高いほどセンサ値は高くなり分解能が向上する。係数 k は、コンデンサを接続する場合と接続しない場合の値をそれぞれ計測し、連立方程式を解くことで求める。

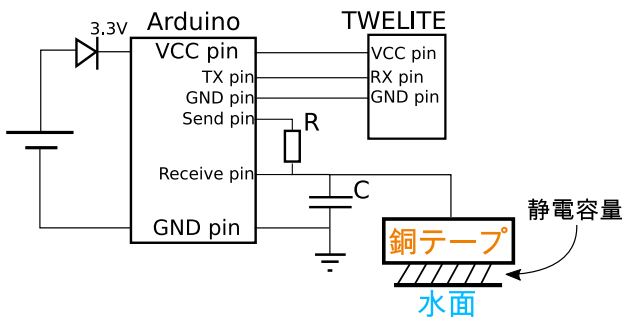


図 1: 静電容量センサ回路図

ブレッドボード(Arduino Pro Mini, TWELITE DIP)

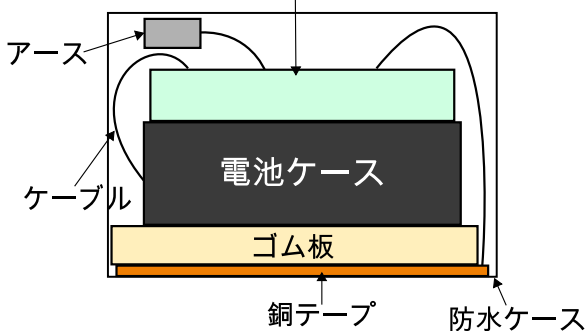


図 2: 開発したノード概要

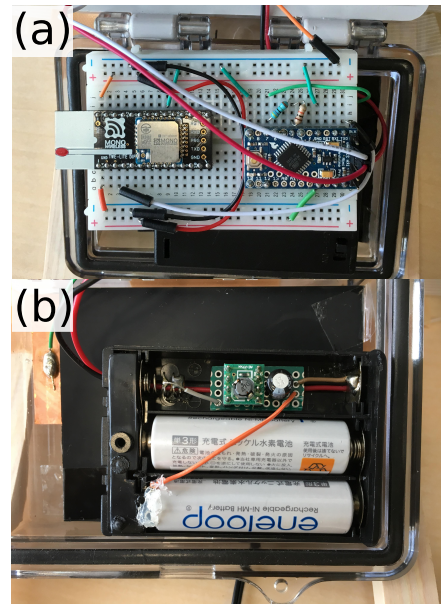


図 3: 回路と電池ケース内部の写真

4. 評価実験

排水溝の蓋の裏面から非接触で水位を計測するために、水面と銅テープの間に生じる静電容量が、様々な条件で、どのように変化するかを確かめることで、我々が実装したノードの評価を行った。

実験環境を図 4 に示す。外部の静電容量の影響を受けにくい非導電性のガラス製の水槽を容器として実験を行った。水槽は、30cm 立方の GEX 製ガラステリアキューブ 300、水は常温の水道水を用いた。ノードの設置方法は、水槽の上部に 2 本の木材を設置し、その隙間にノードケースの底面に貼り付けたアクリル板を引っかけることで固定した。特に記述のない場合は、アース接続あり、サンプリングレート 255、抵抗値 10M Ω 、コンデンサ容量 0F (接続無し)、水の入っていない状態の水槽で実験を行った。それぞれの測定では、ノード、水位を固定し、センサ値を 100 回取得した。また、ノードに付着した水滴は、実験の度に拭き取り、常に水滴が付着していない状態で実験を行うものとした。



図 4: 実験環境写真

4.1. センサの応答性

センサの応答性について調べるため、空中に浮かせたノードを素早く水につけたときのセンサ値の推移を測定した。この実験の水位は、ノードが1cm浸水する位置に設定した。計測開始から7秒付近で水につけたときの、経過時間に対するセンサ値の推移を図5に示す。着水直後センサ値が一気に上昇し、その後水面の波の揺れに伴って、徐々にセンサ値の揺れも小さくなっていった。

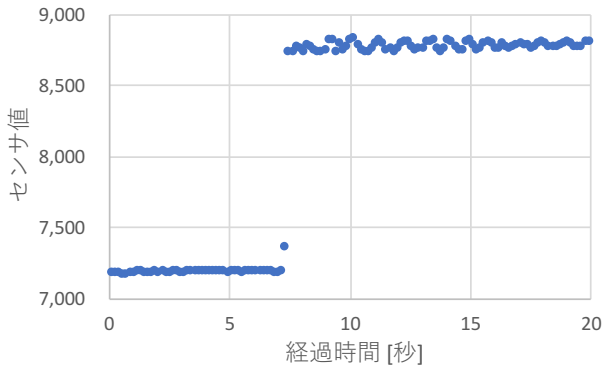


図5: ノード着水前後のセンサ値の推移

4.2. アース接続

アース接続がセンサ値に与える影響を調べるため、アース接続を行う場合と、行わない場合、それぞれで1時間放置し、値の変化を計測した。各々の測定における、最も小さかったセンサ値を基準としたときの、センサ値の変化量を図6に示す。アース接続なしの状態では値が上昇していったが、アース接続を行うことで、値の上昇が抑えられた。

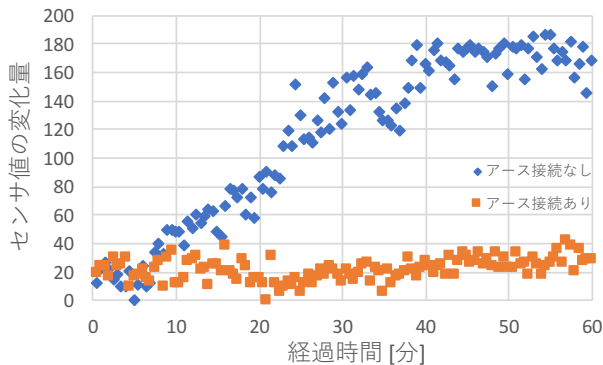


図6: アース接続の有無によるセンサ値への影響の比較

4.3. 抵抗

抵抗値とセンサ値の関係を調べるため、抵抗値を変化させ、その度に計測を行った。抵抗値ごとのセンサ値の平均の比較を図7に示す。抵抗値の上昇に伴ってセンサ値も上昇した。

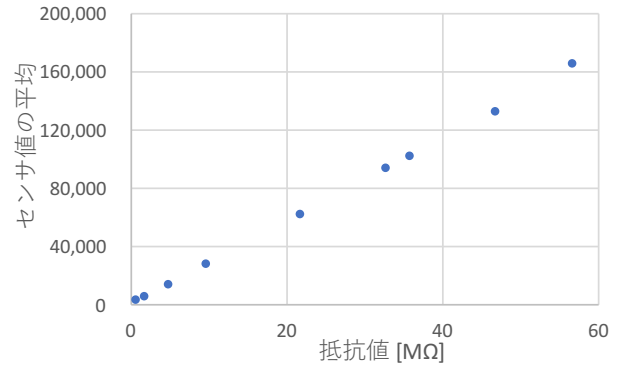


図7: 抵抗値に対するセンサ値の比較

4.4. コンデンサ

コンデンサ容量とセンサ値の関係を調べるために、コンデンサ容量を変化させ、その度に計測を行った。コンデンサ容量0Fを基準とし、コンデンサ容量ごとのセンサ値の平均の変化量の比較を図8に示す。コンデンサ容量の上昇に伴ってセンサ値も上昇した。

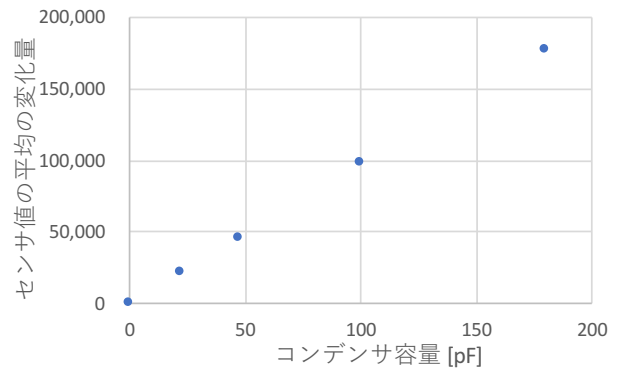


図8: コンデンサ容量に対するセンサ値の変化量の比較

4.5. サンプリングレート

サンプリングレートとセンサ値の関係を調べるため、サンプリングレートを変化させ、その度に計測を行った。サンプリングレートごとのセンサ値の平均の比較を図9に示す。

サンプリングレート値以外が同条件の場合、センサ値の標準偏差をサンプリングレートで割ることで、センサの安定性を比較できると考えた。サンプリングレートごとに、センサ値の標準偏差をサンプリングレートで割った値（以下、標準偏差）の比較を図10に示す。サンプリングレートの上昇に伴ってセンサ値は上昇し、標準偏差は減少した。

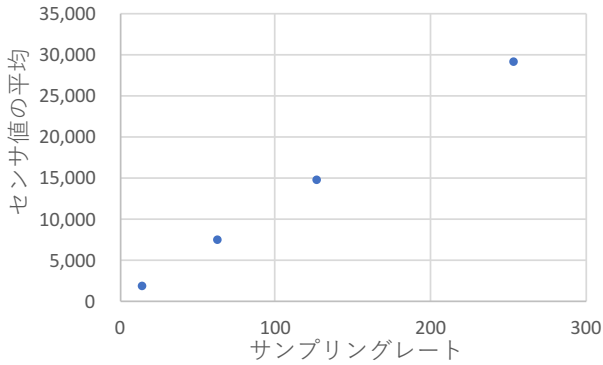


図 9: サンプリングレートに対するセンサ値の比較

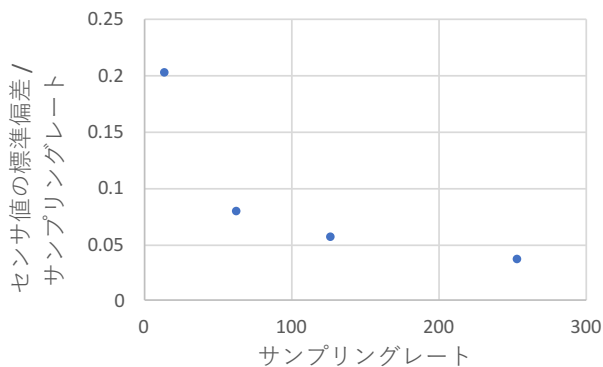


図 10: サンプリングレートに対するセンサ安定性の比較

4.6. 水位と静電容量

水槽の水位と静電容量の関係を探るために、センサから水面までの距離を変化させ、その度に計測を行った。この実験は、変化量をよりわかりやすく可視化するために抵抗値 47M Ω 、計測時間を短縮するためにサンプリングレート 128 で行った。センサと水面の距離ごとのセンサ値の平均の比較を図 11 に示す。センサと水面の距離が近くなるに伴ってセンサ値も上昇した。

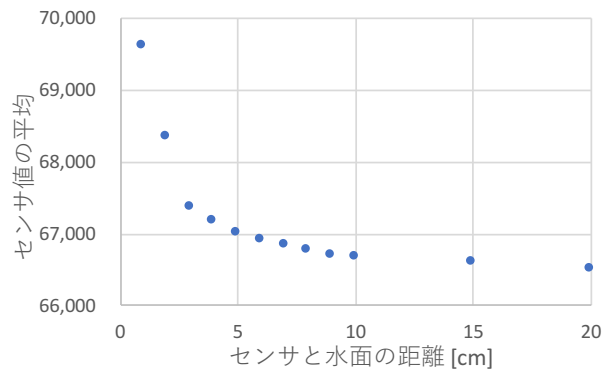


図 11: センサと水面の距離に対するセンサ値の比較

5. 考察

以下で実験結果に対する考察を述べる。

5.1. センサの応答性

図 5 より、ノードが水に浸かった瞬間センサ値が上昇し、その後センサ値の上昇がみられないことから、このセンサの応答性は十分に優れていると考えられる。また、水面の波の様子を検知できていることから、センサの精度が十分に高いといえる。

5.2. アース接続

アース接続を行うことで、センサに徐々に蓄積される電荷を解消することができるため、図 6 のような結果になったと考えられる。実際に想定している、長時間での使用が可能になるため、アース接続を行うことは非常に有効だと考えられる。

今回は絶縁体で覆ったアルミテープに接続したが、アース付きコンセントへ接続した場合、どのような変化が見られるのかなども検討の余地がある。

5.3. 抵抗

図 7 のグラフから、抵抗値とセンサ値は比例関係にあると読み取れる。これより、抵抗値を上昇させることでセンサの分解能が向上するといえる。また、この結果は式 (1) から妥当といえる。

5.4. コンデンサ

図 8 のグラフから、コンデンサ容量とセンサ値の変化量は比例関係にあると読み取れる。この結果は式 (1) から妥当といえる。また、コンデンサ容量を変えて 2 回測定し、コンデンサ容量の差とセンサ値の差から式 (1) の係数 k のおよその値を求めることができる。これより、検知したい静電容量に具体的な単位をつけることや、検知したい静電容量に適した環境を、計算で求めることができる。実際に結果から係数 k を計算すると、本実験環境においてはおよそ 3.8×10^5 となった。

5.5. サンプリングレート

図 9 のグラフから、サンプリングレートとセンサ値は比例関係にあると読み取れる。これは、抵抗値と同じく分解能を向上することになるが、抵抗値が小さく、検知したい静電容量の 1 サンプルリング値あたりの変化量が 1 未満になってしまう場合などは、いくらサンプリングレートを増やしても、センサ値に変化が現れにくくなってしまう。よって、検知したい静電容量に応じて最低限の抵抗値を与えた上で、サンプリングレートを増やすことで分解能を向上できるといえる。また、この結果は式 (1) から妥当といえる。

図 10 のグラフから、サンプリングレートと標準偏差は反比例の傾向にあると読み取れる。これより、サンプリングレートを増やすことでセンサ値の安定性が向上するといえる。

5.6. 水位と静電容量

図 11 のグラフから、センサと水面の距離とセンサ値は反比例の傾向にあると読み取れる。これは、水面がセンサに近くことで、反応する静電容量も大きくなるということの意味する。

水槽に水がない状態を基準としたときの、距離 1cm、10cm、20cm のときに反応した静電容量を式 (1) から計算すると、それぞれおよそ 1.38pF、0.10pF、0.02pF となった。実験 4.4 のサンプリングレート 255 の時の標準偏差はおよそ 9 であり、反応した静電容量の値に

直すと、およそ0.01pFとなる。これより、本実験の環境においてセンサから10cm離れた水面の距離を検知することは可能であると考えられる。また、10cmという距離は想定している排水溝内での使用において十分な距離である。

6. まとめ

本論文では、目立たず、かつ低コストで細やかに地下空間での氾濫を検知することを目指し、排水溝内での氾濫検知に静電容量方式の水位センサの適用を提案した。また、我々は防水非接触型水検知無線センサノードを試作し、ノードに設置された銅テープと水面の間に生じる静電容量が、水面との距離やその他の条件によってどのように変化するかを評価実験により確かめた。以上より、提案手法は排水溝内での氾濫検知への活用が十分期待できる。今後は、実際の環境下においても、より高い精度での計測を目指し、水滴や水質など、誤検知となる要素の分離に取り組む。

謝辞

本研究は、NICT ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発「オープン・スマートシティを実現するソーシャル・ビッグデータ利活用・還流基盤」の支援を受けている。本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人: JST)によって実施された。

参考文献

- [1] 総務省, “水防法等の一部を改正する法律 改正の概要,” http://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/suibouhou_gaiyou.pdf.
- [2] K. Loizou, E. Koutroulis, D. Zalikas, and G. Liontas, “A low-cost sensor based on time-domain reflectometry for water level monitoring in environmental applications,” 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp.261–266, (2015).
- [3] S. Development, “Grove - water sensor,” <http://www.seeedstudio.com/depot/grove-water-sensor-p-748.html>.
- [4] K. Chetpattananondh, T. Tapoanoi, P. Phukpat-taranont, and N. Jindapetch, “A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.209, pp.175–182, (2014).
- [5] A. Jahn, F. Ehrle, and C. Roppel, “A level sensor for fluids based on hydrostatic deformation with piezoelectric generated sounds in a low frequency range,” 2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC), pp.245–249, (2014).
- [6] 鈴木洋之, 落合厚, 須賀正志, 溝口敦子, “小規模ダム貯水池で洪水時に生じる流量推定精度の劣化,” *土木学会論文集 B*, vol.65, no.2, pp.81–86, (2009).
- [7] 坂西研二, 芝野和夫, 大嶋秀雄, “農村地域小河川における水質モニタリングに関する調査事例,” *土壌の物理性*, vol.80, pp.49–54, (1998).
- [8] H.-Y. Chang, Y.-C. Chang, H.-J. Sheng, M.-Y. Fu, W.-F. Liu, and R. Kashyap, “An ultra-sensitive liquid-level indicator based on an etched chirped-fiber bragg grating,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.28, no.3, pp.268–271, (2016).
- [9] L. Chen, X. Dong, J. Han, and P. Ye, “Development of a ultrasonic instrument for the sealed container’s liquid level measurement,” *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, vol.1IEEE, pp.4972–4976 (2006).
- [10] S.C. Bera, J.K. Ray, and S. Chattopadhyay, “A low-cost noncontact capacitance-type level transducer for a conducting liquid,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.55, no.3, pp.778–786, (2006).
- [11] F. Reverter, X. Li, and G.C. Meijer, “Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.138, no.1, pp.1–8, (2007).
- [12] M. Demori, V. Ferrari, D. Strazza, and P. Poesio, “A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.163, no.1, pp.172–179, (2010).
- [13] K. Loizou and E. Koutroulis, “Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system,” *Measurement*, vol.89, pp.204–214, (2016).
- [14] P. Badger, “Capacitive sensing library”. <http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor?from=Main.CapSense>.