

可視光通信を用いた水の濁度推定に関する一検討

A study on estimation of turbidity using visible light communication in underwater sensor networks

八塚 友彦[†] 谷口 義明[†] 波部 斉[†] 阿部 孝司[†] 井口 信和[†]
Tomohiko Yatsuzuka Yoshiaki Taniguchi Hitoshi Habe Koji Abe Nobukazu Iguchi

1. はじめに

天然マグロの減少を背景に、マグロの養殖が注目を集めている。マグロの死因のひとつに、泥水による窒息死がある。そのため、マグロ養殖においては、水中の濁度を計測し計測結果を分析すること、また、計測結果に応じて適切な対策を行うことが重要である。現状、近畿大学の保有するマグロ養殖場においては、ダイバーの目視による水質検査が行われている。濁度計測を自動化できれば、低コストかつ継続的な濁度計測が可能となる。

我々の研究グループでは、効率的なマグロの養殖を行うための様々な検討を行っている [1-4]。その検討の一つとして、生簀や魚、水中ビークル等にセンサ端末を装着し、環境情報や魚の生態情報をリアルタイムに取得する水中センサネットワークを構築することを検討している [1, 2]。なお、水中においては電波の減衰が大きいため、端末間の通信には超音波通信や可視光通信を用いることを想定している。ここで水中の濁度が変化すると、ビットエラー率が変化するなど、通信性能が変化すると考えられる。これらの水中センサネットワークにおける端末間通信とあわせて水の濁度を推定できれば、濁度推定のための追加の設備投資が不要あるいは削減できると考えられる。

本稿では、端末間通信として可視光通信を用いた場合を想定し、水の濁度と通信特性の関係を実験により調査する。実験では、水槽の両端に市販の可視光通信機器を装着し、機器間距離や水槽中の水の濁度を様々に変えた時の通信特性を調査する。また、実験結果から、可視光通信機器を用いた水中の濁度推定に関する検討を行う。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、2章で関連研究について述べる。次に、3章で実験環境について述べ、4章で実機実験により濁度が通信特性に与える影響を評価する。最後に、5章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

濁度を計測する機材は様々な物が市販されているが、市販の濁度計は高価であり、また、設置箇所の濁度しか計測できない。市販の濁度計を用いて広域な領域の濁度分布を調べるためには、多数の濁度計を設置するか、あ

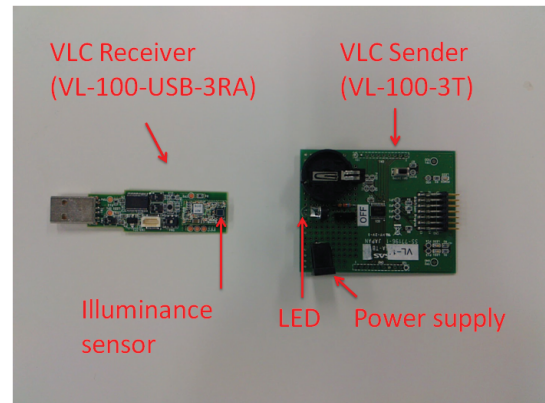


図 1: 可視光通信送受信機

るいは、水中ビークルに濁度計を装着するなどして濁度計を移動させる必要がある。

一方、カメラ [4]、ハイパースペクトルカメラ [5]、LED [6]、通信機器 [7] 等を用いた水中の濁度推定の研究が行われている。文献 [4] では、水中カメラを用いて撮影領域の濁度を計測する手法を検討している。これらの手法では一度に計測可能な領域は広がるが、濁度推定のための専用のカメラが必要となる。

文献 [7] では、本稿における検討と同様に、可視光通信機器を用いて水の流速と濁度を推定する手法を検討している。この研究は、可視光の物理特性のみに着目し、受信した光を信号処理技術に基づき処理することで流速と濁度を推定する。しかしながら、必ずしも市販の可視光通信機器でこのような物理層の情報を取得できるとは限らない。本稿では、可視光通信規格標準 [8] に準拠した市販の可視光通信機器間でデータ通信を行い、上位層で得られる受信率などの情報を用いて、濁度を推定する。

3. 実験環境

本章では実験環境および実験手順について述べる。

3.1 可視光通信機器

まず、実験で用いる可視光通信機器について述べる。本稿における実験では、可視光通信送信機として内藤電誠社製の VL-100-3T [9] を、受信機として同社製の VL-100-USB-3RA [10] を用いる (図 1)。これらの機器では、変調方式としてパルス位相変調 (4 Pulse Position Modulation) を採用しており、データレートは 4.8 kbps

[†] 近畿大学, Kindai University

である。また、これらの機器は、我が国の可視光通信の規格の一つである JEITA CP-1223 [8] に準拠している。

送信機は単体で動作し、同一のフレームを常に送り続ける。フレームのサイズはヘッダが 6 バイト、ペイロードが 16 バイト、フッタが 2 バイトの計 24 バイトである。フレームのペイロードは送信機上のスイッチを押下することにより切り替え可能である。また、送信機のファームウェアを書き換えることにより任意のペイロードを設定可能である。本稿の実験では初期状態のペイロード (Renesas .Renesas. の 16 バイト) を用いた。

なお、本送信機は通常 3V コイン電池で駆動するが、電池の供給する電圧により LED の発光強度が変化し通信性能が変動する。そこで、電池の残量や電池の性能のばらつきの影響を抑えるために、3.3V 出力の AC アダプタにより駆動するよう送信機基盤に DC ジャックを取り付けた (図 1)。本稿の実験結果は全て、AC アダプタを装着した状況での結果である。

受信機は、USB ケーブルを介して PC と接続される。このことにより、PC 側から受信機の制御、取得パケットの収集や電圧供給を行える。受信機には照度センサが搭載されており、受信した可視光をフレームに変換する。受信機の実験可能照度は 6.5 Lx である。適切なフレームを受信できれば、受信フレームのデータを PC に送信する。なお、本稿の実験で使用した受信機のファームウェアのバージョンは 4.0.0.0 である。

3.2 通信特性評価指標

PC 上で、本機器に付属しているソフトウェアを用いることで、ある計測期間 T において受信した全フレームのペイロードを取得できる。また、計測期間中に受信できなかったフレーム数 n_{loss} 、一部のデータのみ受信できたフレーム数 n_{err} 、問題なく受信できたフレーム数 n_{suc} も取得できる。

本稿では、計測期間 T 中のフレーム受信成功率 r_{suc} とフレーム受信率 r_{rec} を下記式により求める。

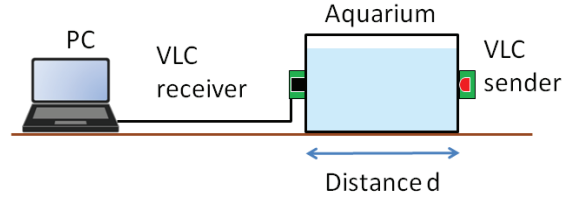
$$r_{suc} = \frac{n_{suc}}{n} \quad (1)$$

$$r_{rec} = \frac{n_{suc} + n_{err}}{n} \quad (2)$$

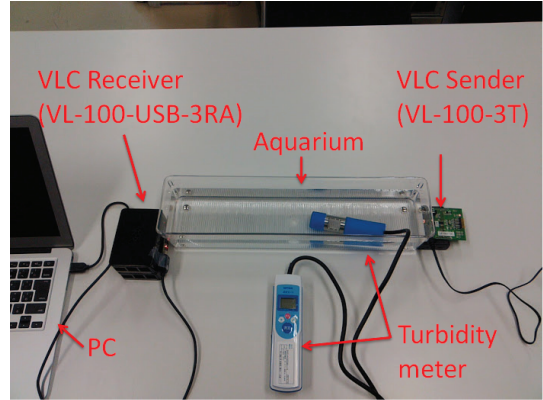
ここで、 n は全フレーム数であり、 $n = n_{loss} + n_{err} + n_{suc}$ である。

加えて、受信したフレームのペイロードを調査することにより、バイト単位での受信成功率 r_{byte} を下記により求める。

$$r_{byte} = \frac{1}{n_{err} + n_{suc}} \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{n_{err} + n_{suc}} \sum_{j=1}^L cmp(d_{i,j}^{recv}, d_j^{send}) \quad (3)$$



(a) 概要



(b) 実験 (照明下)



(c) 実験 (遮光下)

図 2: 濁度計測実験構成

ここで $d_{i,j}^{recv}$ は i 番目に受信したフレームのペイロードにおける j 番目のバイト、 d_j^{send} は送信フレームのペイロードにおける j 番目のバイトである。 L はペイロードの長さであり、本実験環境では $L = 16$ である。関数 $cmp()$ はデータが同じ場合に 1 を返す。

3.3 水中実験環境

実験環境全体の構成図を図 2 に、使用した機材を表 1 に示す。本研究では可視光通信機器の水中での使用を想定しているが、水中の実験環境を準備することは容易ではない。そこで、本稿での実験では、水槽の両端に可視光通信送信機と受信機を固定することにより、送信機から送出された可視光が水中を通り受信機に届く環境を実現する。なお、受信機は PC と接続する。

送信機と受信機間の距離を変更するために、本稿に

表 1: 使用機材

名称	メーカー・型番
可視光通信受信機	内藤電誠 VL-100-USB-3RA
可視光通信送信機	内藤電誠 VL-100-3T
水槽 1 (16.3 cm)	8.1×16.3×5.1 cm
水槽 2 (20.3 cm)	10.2×20.3×7.6 cm
水槽 3 (25.0 cm)	8.1×25.0×5.1 cm
水槽 4 (30.5 cm)	10.2×30.5×7.6 cm
水槽 5 (40.6 cm)	10.2×40.6×7.6 cm
入浴剤	白元 にごり湯紀行 (黒川)
濁度計	Optex TD-M500
遮光カーテン	Etsumi ETM-83774 1×1 m

おける実験では、表 1 に示す 5 種類の水槽（透明なトレイ）を用いる。そのため、本実験環境では、16.3 cm から 40.6 cm までの範囲の 5 種類の送受信機間距離 d に対する実験結果を取得できる。本稿における実験では、濁度の調整には、入浴剤を用いる [4]。また、濁度の計測には市販の濁度計 Optex TD-M500 [11] を用いる。この濁度計は、ホルマジン濁度単位（Formazin turbidity unit: FTU）で、0 から 500 度までの濁度を計測できる。なお、精製水 1 リットルに 1 mg のホルマジンを溶かした時の濁度が 1 FTU である。

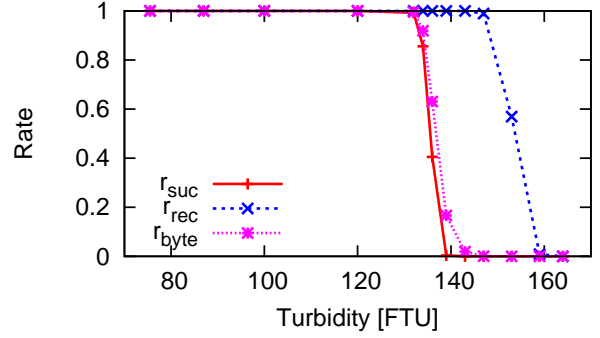
本稿における実験では、周囲の明るさの影響を確認するため、通常の照明下の室内での実験と遮光下での実験を行う。遮光時の実験は、図 2(c) に示すように、遮光カーテンで実験機材を覆うことにより行う。

3.4 実験手順

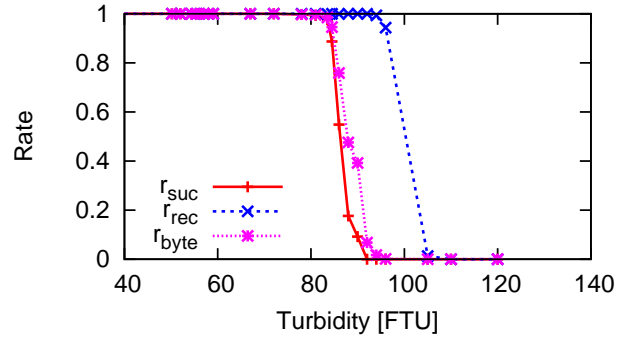
これまでに述べた機材、環境を用いて実験を行う。本稿における実験では、まず、水道水で満たした水槽を準備した後、下記の手順で実験を行う。

1. 濁度計を水槽に入れ濁度を計測する。
2. 可視光通信機器を用いて 60 秒間のデータ送受信を行い、その時の通信特性（3.2 節参照）を取得する。
3. 同様に、機材を遮光カーテンで覆った後状態での 60 秒間の通信特性を取得する。
4. Step 2 および Step 3 いずれにおいてもフレームが完全に受信できない場合、この水槽での実験を終了する。
5. 入浴剤を溶かした溶液を少量水槽に加え、攪拌棒で攪拌する。その後、Step 1 に戻る。

以上の手順の実験を、すべての水槽に対して行う。



(a) 水槽 4 (Distance $d=30.5$ cm)



(b) 水槽 5 (Distance $d=40.6$ cm)

図 3: 濁度が通信性能へ与える影響の評価結果（照明下）

4. 実験結果

本章では実験結果について述べる。

4.1 濁度と通信性能の関係

図 3 に、水槽 4、水槽 5 において濁度を変化させた場合の、フレーム受信成功率 r_{suc} 、フレーム受信率 r_{rec} およびバイト受信率 r_{byte} を示す。また、図 4 に、同じ水槽を用いた場合の遮光時の実験結果を示す。なお、いずれの水槽においても同様の傾向を示したため、水槽 4 および水槽 5 の結果を代表として示している。

図中いずれの結果においても、濁度が小さい場合は、フレーム受信成功率 r_{suc} は 1 である。少しずつ濁度を増やしていくと、ある濁度を越えた瞬間、急激にフレーム受信成功率が下がる。この時の濁度を、本稿では通信可能濁度 T_{suc} と表記する。通信可能濁度 T_{suc} は距離 d によって異なる。

通信可能濁度を越えてさらに濁度を増やすと、ある濁度を越えた瞬間に、急激にフレーム受信率が下がり、やがて、フレーム受信率 r_{rec} は 0 となる。これは、送受信端末間で通信が行えないことを意味する。この時の濁度を、本稿では、受信検知濁度 T_{rec} と表記する。受信検知濁度 T_{rec} も通信可能濁度と同様に距離 d によって異なる。以上の結果より、濁度と端末間距離 d が可視光通信の性能に影響を与えることが分かる。なお、受信検知濁

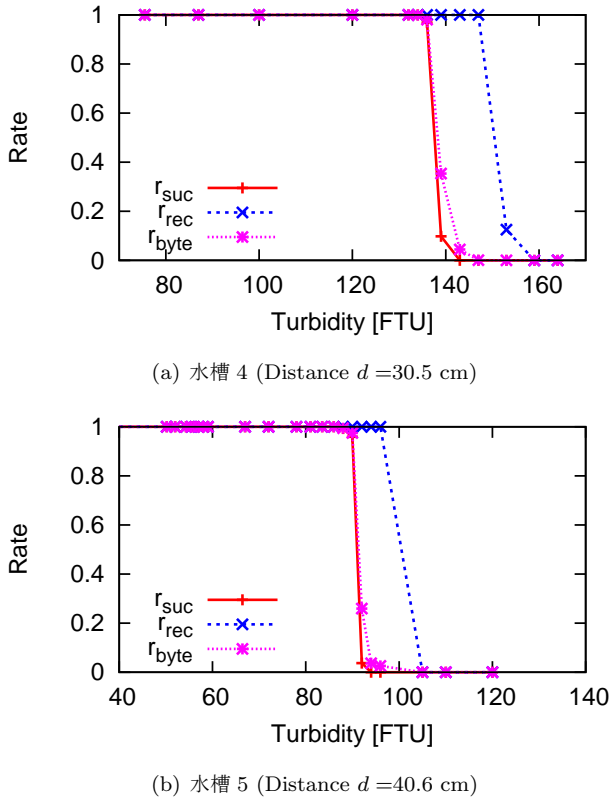


図 4: 濁度が通信性能へ与える影響の評価結果 (遮光下)

度 T_{rec} 付近の濁度では、機器付属のソフトウェアの不具合により通信性能の計測ができない。そのため、図 3 中、受信検知濁度付近での計測点が少なくなっている。

一方、図 3 と図 4 を比較すると、遮光下の方が、照明下の場合と比べてやや高い濁度まで通信が可能であるが、両者で大きな差はないことが分かる。これは、実験に使用している可視光通信送信機 LED の送出光の波長が、室内の蛍光灯の光の影響を受けにくい波長であるためと考えられる。太陽光下でも同様の傾向を示すかどうかは、今後、実験により明らかにする必要がある。

図 5 は距離と受信可能濁度 T_{suc} および受信検知濁度 T_{rec} の関係を表している。図中、受信可能濁度 T_{suc} よりも下の領域では、フレーム受信成功率 $r_{suc} = 1$ が達成される。一方、受信可能濁度 T_{suc} と受信検知濁度 T_{rec} の間の領域では、フレーム受信成功率 r_{suc} は 1 を下回るが、フレーム受信率 r_{rec} は 0 より大きい。受信検知濁度 T_{rec} より上の領域では、フレームを受信できない。

4.2 可視光通信による濁度推定

最後に、水中センサネットワーク中の可視光通信による濁度推定について考える。上述の結果は、図 5 に示されるような距離と受信可能濁度、受信検知濁度の関係、および、端末間距離 (端末の位置) が既知の場合に、端末間のフレーム受信成功率、フレーム受信率がわかれば、

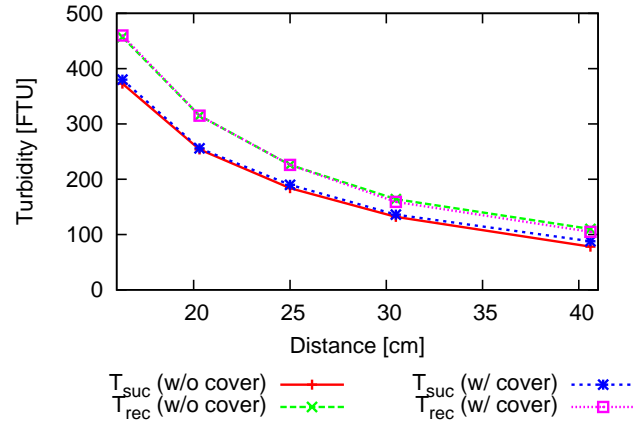


図 5: 距離と受信可能濁度および受信検知濁度の関係

端末間の水の濁度が 3 つの範囲のいずれかを推定できることを示している。例えば、端末間距離が約 20 cm であることが既知の場合、端末間のフレーム受信成功率が 1 であれば濁度は 0 から約 260 の間、フレーム受信成功率が 1 を下回るがフレーム受信率が 0 より大きい場合は濁度は約 260 から約 320、フレームを受信できない場合は濁度が約 320 より大きいと推定できる。

ここで、一方の端末が水中ビークルに装着されている場合、端末間距離を変えながら通信性能を計測できれば、濁度をより正確に推定できる。例えば、ある固定端末に近接している水中ビークルを遠ざかるように移動させた場合、固定端末と水中ビークル間のフレーム受信成功率が 1 より小さくなる距離の受信可能濁度を端末間の水の濁度と推定できる。より具体的な濁度推定手法の検討については今後の課題とする。

5. まとめと今後の課題

本稿では、市販の可視光通信機器を用いた実験により、水の濁度と通信特性の関係を明らかにした。また、可視光通信を用いた濁度推定に関する一検討を行った。

本稿では、単純に距離と通信性能から濁度推定を行う手法を検討したが、可視光通信機器の性能は、機器間 (受信機における照度センサと送信機における LED) の相対角度の影響を受けると考えられる。そのため、機器間の相対角度を考慮した濁度推定を検討する必要がある。また、水中では可視光通信技術と並び音響通信技術もよく用いられる。そのため、音響通信を用いた濁度推定に関する検討も必要である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費 (課題番号 16K00146) によって行われている。ここに記して謝意を表す。本稿は CICSYN 2016 [1] で発表した研究を発展させたものである。

参考文献

- [1] Y. Taniguchi, “Experimental evaluation of effect of turbidity on the performance of visible light communication in an underwater environment,” in *Proceedings of CICSYN 2016*, Jul. 2016.
- [2] 石田晃一, 谷口義明, “養殖魚モニタリング環境下での水中無線通信手法の評価,” 電子情報通信学会関西支部第 21 回学生会研究発表講演会論文集, Mar. 2016.
- [3] Y. Taniguchi, “Experimental evaluation of a WiFi device in an undersea environment,” in *Proceedings of AIMS 2015*, Dec. 2015, pp. 408–411.
- [4] 立石凌亮, 阿部孝司, 波部齊, 井口信和, “画像による水の濁度測定,” 第 21 回信学会関西支部学生会研究発表講演会論文集, Mar. 2016.
- [5] Z. Pan, C. Glennie, C. Legleiter, and B. Overstreet, “Estimation of water depths and turbidity from hyperspectral imagery using support vector regression,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 2165–2169, Oct. 2015.
- [6] S. Mylvaganaru and T. Jakobsen, “Turbidity sensor for underwater applications,” in *Proceedings of IEEE OCEANS 1998*, Sep. 1998, pp. 158–161.
- [7] C.-C. Chang, C.-T. Wu, Y.-B. Lin, and M.-H. Gu, “Water velocimeter and turbidity-meter using visible light communication modules,” in *Proceedings of IEEE SENSORS 2013*, Nov. 2013, pp. 1–4.
- [8] Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA), “CP-1223 visble light beacon system,” available at <http://www.jeita.or.jp/japanese/standard/book/CP-1223/>.
- [9] “VLC Sender Module Evaluation Board,” available at <http://sys.ndk-m.com/products/?id=1413879271-321200>.
- [10] “VLC Receiver Module Evaluation Kit,” available at <http://sys.ndk-m.com/products/?id=1397822228-338715>.
- [11] “OPTEX TD-M500,” available at <http://www.optex.co.jp/env/products/tdm500/>.