

東京大学大学院新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻

平成 24 年度

修士論文

ソナーと光切断法の融合による
水中浮遊物探知手法の研究

2013 年 2 月提出
指導教員 浦 環 教授

47116654 安井 風太

目次

1 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 沿岸域における AUV の問題点	2
1.3 水中での探知手法	2
1.4 本研究の目的	2
1.5 本論文の構成	3
2 ソナーを用いた浮遊物探知	5
2.1 音響による計測	5
2.2 ハードウェア	5
2.2.1 送信波	5
2.3 予備実験	6
2.4 結果	6
2.5 考察	7
3 レーザーとカメラを使った浮遊物探知	18
3.1 光切断法	18
3.2 ハードウェア	18
3.2.1 シートレーザーと回転台	18
3.2.2 カメラとレンズ	19
3.3 計測原理	19
3.3.1 画像処理の流れ	19
3.3.2 2 値化処理	19
3.3.3 計算手順	20
3.4 予備実験	21
3.4.1 キャリブレーション	21
3.4.2 実験	21
3.5 結果	22
3.6 考察	22

4	ソーナーと光切断法を融合した探知手法	43
4.1	はじめに	43
4.2	予測フェーズ	43
4.2.1	音響画像の作成	43
4.2.2	ラベリング	44
4.3	確認フェーズ	45
4.3.1	処理領域の限定	45
4.4	融合手法の結果	46
4.5	考察	46
5	結論	65
5.1	結論	65
5.2	今後の課題	66
	参考文献	68
	謝辞	69

目次

Figure 1.1: Floating Objects got caught to Thruster.....	4
Figure 2.1: Micron	8
Figure 2.2: Trittech software	9
Figure 2.3: Under Water Robot Test Aquarium.....	9
Figure2.4: Micron Beam pattern X-Y plane dogleg mount.....	10
Figure 2.5: Micron Beam pattern X-Z plane dogleg mount	11
Figure 2.6: Micron beam frequency	12
Figure 2.7: Micron beam waveform.....	12
Figure 2.8: Monotonic signal	13
Figure 2.9: CHIRP signal	14
Figure 2.10: Under water robot test aquarium.....	15
Figure 2.11: Fishing line	15
Figure 2.12: Pattern diagram.....	16
Figure 2.13: Fishing line received levels	17
Figure 2.14: Fishing line received levels at 1m.....	17
Figure 3.1: Light sectioning method	23
Figure 3.2: Camera image	23
Figure 3.3: Seat laser.....	24
Figure 3.4: Pan Unit SPU-01a[9]	25
Figure 3.5: Pan Unit and laser in case	25
Figure 3.6: Camera in case.....	25
Figure 3.7: Scorpion SCOR-20SO and SPEACECOM H3.5 1.6.....	27
Figure 3.8: SPEACECOM H3.5 1.6.....	28
Figure 3.9: Original image 1	29
Figure 3.10: Binarized image	29
Figure 3.11: Divided image 1	30
Figure 3.12 Original image and points.....	30
Figure 3.13: Original image 2	31
Figure 3.14: Threshold=170.....	31
Figure 3.15: Threshold=110	32
Figure 3.16: Pixel value graph	32
Figure 3.17: Averaged image	33
Figure 3.18: Subtracted image	33
Figure 3.19: Result image	34

Figure 3.20: Checker bord	34
Figure 3.21: No calibration	35
Figure 3.22: After calibration	35
Figure 3.23: Figure 3.22: After calibration.....	36
Figure 3.24: Adjusted image	36
Figure 3.25: Binarized image	37
Figure 3.26: Object positions	37
Figure 3.27:Fishing line 2.6mm	38
Figure 3.28:Fishing line 2.0mm	38
Figure 3.29:Fishing line 1.65mm	39
Figure 3.30:Fishing line 1.25mm	39
Figure 3.31:Fishing line 0.91mm	40
Figure 3.32:Fishing line 0.66mm	40
Figure 3.33:Fishing line 0.41mm	41
Figure 3.34:Fishing line 0.24mm	41
Figure 3.34:Fishing line 0.15mm	42
Figure 4.1: Flowchart of method.....	47
Figure 4.2: Device.....	48
Figure 4.3: Grid map.....	49
Figure 4.4: Sonar data form	50
Figure 4.5: Sonar beam and grid map	51
Figure 4.6: Grid map and no label.....	51
Figure 4.7: All zero label.....	52
Figure 4.8: Label 1 start	52
Figure 4.9: Mosaic label.....	53
Figure 4.10: Labeled grid map	53
Figure 4.11:Grid map and label.....	54
Figure 4.12: $w1$ and $w2$	54
Figure 4.13: ϕ_1 and ϕ_2	55
Figure 4.14: $v1$ and $v2$	55
Figure 4.15: Limit of image processing area.....	56
Figure 4.16: Grid map . Fishing line 2.6mm range 2m	57
Figure 4.17: Sonar data Threshold>70	57
Figure 4.18: Light sectioning method	58
Figure 4.19: Fusion of sonar and light sectioning method	58

Figure 4.20: Fishing line 2.6mm	59
Figure 4.21: Fishing line 2.0mm	59
Figure 4.22: Fishing line 1.65mm	60
Figure 4.23: Fishing line 1.25mm	60
Figure 4.24: Fishing line 0.91mm	61
Figure 4.25: Fishing line 0.66mm	61
Figure 4.26: Fishing line 0.41mm	62
Figure 4.27: Fishing line 0.24mm	62
Figure 4.28: Fishing line 0.15mm	63
Figure 4.29: Comparison of offset Fishing line 2.6mm 4m.....	63
Figure 4.30: Comparison of offset Fishing line 0.15mm 2m.....	64
Figure 5.1: Fishing line received levels at 1m.....	67

表目次

Table 1.1: Attenuation rate of sound and electromagnetic wave in water [3]	4
Table 2.1: Micron specifications	8
Table 2.2: Micron setting	8
Table 3.1: Specifications of Machine Vision Laser.....	23
Table 3.2: Specifications of Pan Unit SPU-01a[9]	24
Table 3.3: Dimension of camera case.....	25
Table 3.4: Specification of Scorpion SCOR-20SO	26
Table 3.5: Specification of H3.5 1.6	27
Table 4.1: Look up table 1	50
Table 4.2: Look up table 2.....	51
Table 4.3: Measured results.....	57

第1章 序論

1.1 はじめに

人類は有史以前より様々な方法で海中の探索を行ってきた。古くは素潜りや空気の入った樽を使った潜水が行われ、1943年にフランスで考案されたスキューバダイビング(SCUBA: Self Contained Underwater Breathing Apparatus: 自給式水中呼吸装置 Diving)のように、タンクに詰めた圧縮空気を専用の装置で呼吸することで水上からの束縛なしに海中を泳ぎまわる技術も開発された。しかし、このような方法も様々な問題を抱えている。水深による高分圧の窒素を摂取することで生じる窒素酔いや、高分圧下で体内に溶解込んだ窒素が浮上による圧力低下によって体内で気泡化し関節痛などを発生させる減圧症などである。このような問題に対して、体内に溶解込んだ気体の排出に掛かる時間を記入した減圧表の作成が行われ、浮上する際に各水深で減圧停止を行うことで減圧症を防ぐことができるようになった。また、さらに深い海中での作業を目的として、酸素とヘリウムの混合気体ヘリオックス(Heliox)を用いた飽和潜水の技術が確立され、北海の石油開発現場では水深 500~600m までの潜水が行われている[1]。

このように人間の行動可能な水深と範囲は広がっていったが、水压に人体を適応させるために加圧と減圧に数日掛かるなど膨大な費用と時間が掛かるうえ、人体が水压に直接さらされる潜水手法は体力の消耗が激しく、強健な若者しか勤まらないものであり続けた。

このような問題に対して、耐圧容器を使い潜水者を大気圧下に置く有人潜水機(HOV : Human Occupied Vehicle)や遠隔操縦ロボット(ROV : Remotely Operated Vehicle)が考え出された。世界最深度であるマリアナ海溝に到達した HOV : ”トリエステ号”や日本の ROV : ”かいこう”をはじめ試料採取や映像取得など様々な用途に使用されている。このように探索可能な海域と水深は広がったが、アンビリカルケーブルの限界、オペレーターの疲労、大型でコストの掛かる支援設備がさらなる発展に対する障害となった。

そこで、現在は自律型無人潜水機(AUV : Autonomous Underwater Vehicle)の開発が目されている。頭脳とエネルギー源を内蔵することで、アンビリカルケーブルを持たず人間の管制を必要としない AUV は、HOV や ROV とくらべ大規模な支援設備を必要とせず、操縦者の疲労もないことから、運用コストを低く抑え、より広範囲に長時間展開することが可能になる。現在は海底熱水鉱床や氷海域、生物調査に利用されており、今

後も AUV の特徴を活かした新たな利用方法が期待されている。

1.2 沿岸域における AUV の問題点

東日本大震災後、津波に襲われ多くの被害を出した南三陸町では、漁業再開のため、ROV による海底調査が行われた[2]。多数の瓦礫が海に流れ出たことで養殖いかだの設置や定置網など漁業の再開が危ぶまれていたが、ROV が取得した海底映像から、瓦礫の量は少なく漁業再開が可能であることが判明した。これは海中ロボットが活躍した一例であるが、問題点も指摘された。調査当時の現場海域には、津波によって流れ出したと思われる多数の浮遊物が漂っており、Fig1.1 のように ROV のスラストに絡まり航行不能になることがあった。この例のように、通常の沿岸域でも使われなくなった漁網や釣糸、捨てられたごみが AUV のスラストや機体の一部に絡まり航行不能に陥ってしまう可能性が懸念されている。アンビリカルケーブルを持つ ROV と違い無索の AUV では、このようなトラブル致命的であり、最悪の場合浮上することもできず機体が沈んだままになってしまう。

1.3 水中での探知手法

水中における探知手法では、主に音波や可視光が使用される。音波は水中における減衰率が小さいため有効距離は長いが、指向性が高くないため分解能が低くなる。また、反射波の弱い障害物を安定して探知することも難しく、ターゲットとノイズを分離することも困難とされている。Table1.1 に示すように電磁波では特に可視光と超長波の減衰率が小さい。このため、超長波は水中をある程度透過することが可能となるが、通信装置が大規模になるため水面近くの潜水艦との通信に用いられる程度である。可視光ではステレオカメラやシートレーザーを使った光切断法など可視光による探知手法が研究されている。微細な障害物も認識できるが、水中ではレーザーの減衰率も大きく水の透明度も必要となる欠点がある。

1.4 本研究の目的

そこで、本研究ではこのような問題に対応するため、音波と可視光を組み合わせた水中浮遊物の全自動探知システムを開発する。0.5 ノット(0.26m/s)で進むホバリング型 AUV が余裕をもって回避できるように、1m~3m の探知レンジを目標とし、沿岸域で問題となり、音波の反射波が弱く可視光でも探知が困難と思われる釣糸を探知対象とす

る。水槽実験により提案手法を検証し、音波、可視光単独の結果より高い有効性を持つことを目標とする。このような探知システムにより AUV が沿岸域で展開する際、より帰還率が高まることが予想される。

1.5 本論文の構成

本論文は本章を含めて全 5 章で構成される。第 2 章ではソーナーの作動原理を紹介する。第 3 章では光切断法の動作原理を紹介する。第 4 章では光切断法とソーナーの統合手法を述べる。最後に、第 5 章では本研究の結論、考察及び今後の課題について述べる。

Table 1.1 Attenuation rate of sound and electromagnetic wave in water [3]

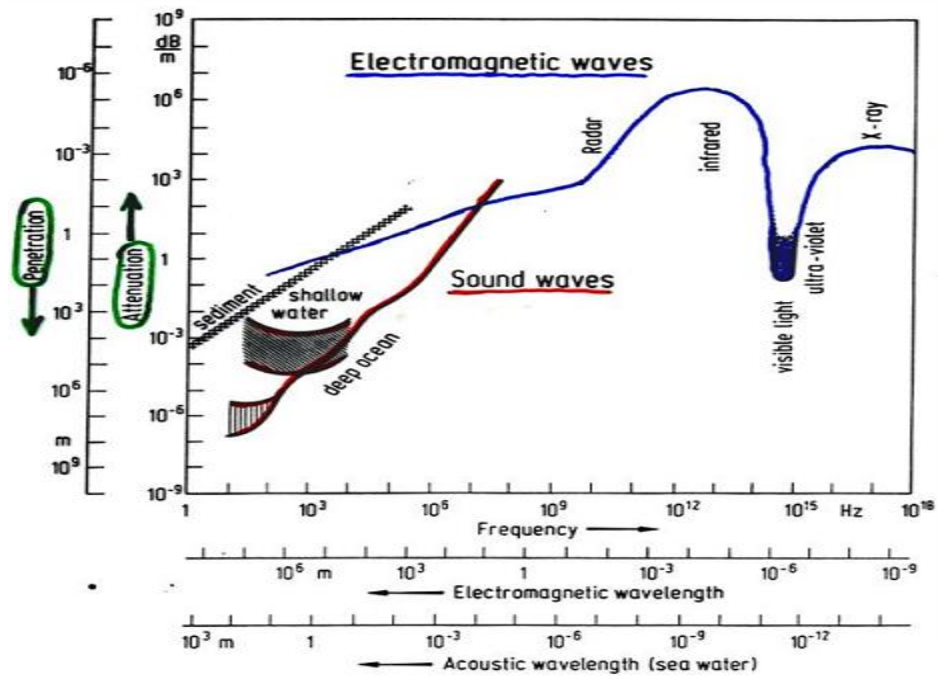


Figure 1.1 Floating objects got caught to thruster

2 章 ソナーを用いた浮遊物探知

2.1 音響による計測

海中で使用される探知センサーの一つとして、音波を利用するソナー(SONAR: Sound Navigation And Ranging)がある。広義には水中音波を用いて物体に関する情報(位置など)を得る技術または手法を指し、リモートセンシングに用いられる。大きく分けて、自ら音波を発し反射波を計測するアクティブソナーと、ターゲットの発する音波を計測するパッシブソナーがある。本研究は音波による探知手法に、アクティブソナーを用いる。

アクティブソナーは、海中に音波を発し、ターゲットに当たった反射波が戻ってくるまでの経過時間と水中音波の伝播速度からターゲットまでの距離を割り出すソナーである。潜水艦で探知に使用されるものから、海底面探査、魚群探知機、地層探査、音響映像、音響通信など広く使用されている。また、蝙蝠やイルカもソナーと同じ仕組みで物体の位置を把握している[4]。

周波数が高いほど波長が短くなるため分解能が高くなり精度も向上するが、水中での減衰率も周波数に伴い増加し有効距離も短くなる傾向があるため、用途に合わせ様々な周波数の音波が使用されている。

2.2 ハードウェア

本研究では、Figure 2.1 に示すような Tritech 社のメカニカルスキニングソナー Micron を使用する。Micron は縦角度 30[deg]、横角度 3[deg]の音波を発し、反射波が計測される時間と水中音速を用いて、物体までの距離を計測する。内部の電気-音響変換素子の方向を機械的に変化させることで、360 度周囲にある物体までの距離を計測する[5]。Figure 2.2 に Tritech 社製ソフトウェアで太さ 2.6mm のナイロン製釣糸を計測した結果を示す。東京大学生産技術研究所水中ロボット試験水槽で Figure 2.3 に示す位置に Micron を設置し、X 軸方向 3m の距離に釣糸を吊り下げ計測を行った。

2.2.1 送信波

ソナーは電気-音響変換素子によって、電気信号と音響信号を圧力変化の形で相互に変換している。これは水晶や特定のセラミックに圧力をかけると歪みにより起電力が生じる圧電効果を利用したもので、逆に圧力変化をうけると起電力が生じる。複数の電気-音響変換素子を直線上に並べ、同位相で振動させることで強い指向性をもつ音波を発する。このような指向性を持つ音波をメインローブと呼ばれ、メインローブ以外の方

向にも、サイドローブと呼ばれる弱い音波を発する。Figure 2.4,2.5 にビームパターンを示す。0° 方向の音波に対し、強さが 1/2(-3[dB])になる角度までをメインローブとして、送信波の角度を縦角度 30[deg]、横角度 3[deg]としている。

Micron は CHIRP(Compressed High Intensity Radar Pulse)波を送信波として用いる。これは Figure 2.6,2.7 のように周波数を変化させた送信波である。送信波継続時間を p_l [s],水中音速を v_s [m/s],と置くと、Figure 2.8 のように単一の周波数を使用するとき、分解能 r_{rm} は(2.1)で定義される。

$$r_{rm} = \frac{v_s \times p_l}{2} \quad (2.1)$$

これに対し、Figure 2.9 のように CHIRP 波を使用すると、分解能 r_{rc} は周波数の最大値と最小値の差を b_w とおくと、(2.2)で求められる。

$$r_{rc} = \frac{v_s}{b_w \times 2} \quad (2.2)$$

Tritech 社ソーナーでは、 $p_l=50E-3$ [s]、 $b_w=100$ [kHz]程度であるため、 $r_{rm}=5r_{rc}$ となる。そのため、CHIRP 波を使うことで単一周波数の約 5 倍の分解能を持つことができる。

2.3 予備実験

釣糸の反射強度を調べるため、水中ロボット試験水槽で計測実験を行った。Figure 2.10 に示す位置にソーナーを水深 2m の水深で設置し、1m から 4m まで 1m 刻みで釣糸を設置した。探知対象は Figure 2.11 に示すナイロン製、太さ 0.15mm~2.6mm の 9 種類の釣糸で、錘で水槽底面近くまでつり下げられている(Figure 2.12 参照)。Figure 2.13,2.14 にソーナーの出力結果を示す。

2.4 結果

実験の結果から、釣糸の反射強度を計測することができた。1m から 3m までは釣糸との距離と相関関係をもって反射強度が低下するが、4m ではそのような傾向が見られない。これは、距離に応じて出力の閾値を変化させているためと考えられる。反射波は距離に反比例して減衰するため、近距離と遠距離の反射波を同一のゲインで表示すると、近距離のみははっきりした結果が出力される。そこで、遠距離の反射波を出力する際、ゲインを上げることで、より見やすい結果としている。この補正を TVG(Time Variable

Gain)という。また、太さ 0.15mm～0.66mm の釣糸では、太さと反射強度に相関関係があるが、それ以降の太さの釣糸ではそのような関係はない。釣糸の反射強度以外にも、壁面からのマルチパスやサイドローブによるものと推測される様々なノイズを計測した。3m 以上の距離では太さ 0.15mm の釣糸の反射強度は、このようなノイズとほぼ等しく判別は難しい。

2.5 考察

太い釣糸は反射強度が大きくノイズとの識別も容易であるが、細い釣糸はノイズとの判別が難しい。そのためソーナー以外の計測手法も必要となることが判明した。釣糸以外では、水槽壁面とノイズが計測された。壁面付近の反射強度は平均約 100 程度あり、ノイズは約 10 程度である。

Micron の音響ビームが縦長形状のため、垂直に吊り下げられた釣糸には、一度にあたる音波は大きくなる。しかし、実海域ではそのような有利な条件だけではなく、より条件の悪い場合が考えられる。



Figure2.1 Micron

Table2.1 Micron specifications

周波数	700[kHz]
送信波縦角	30[deg]
送信波横角	3 [deg]
Range	0.5-100[m]
空中重量	330[g]
最大出力音圧	207[dB] re 1[μ Pa] @1[m]
作動電圧	24[V]

Table.2.2 Micron setting

Range	5[m]
水中音速	1507.4[m/s]
Sampling interval	640E-9[s]
分解能	2.4[cm]
Step 角度	3.6[deg]

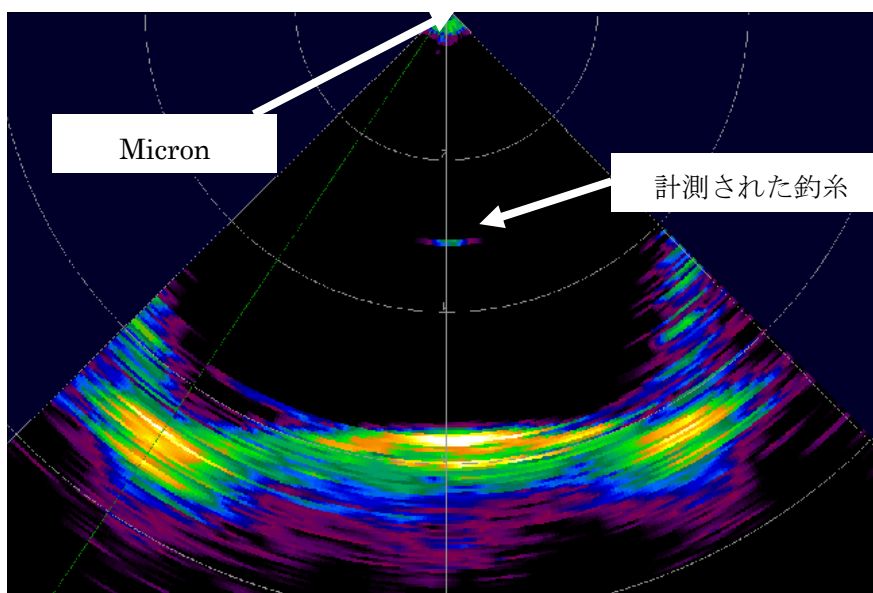


Figure 2.2 Tritech software

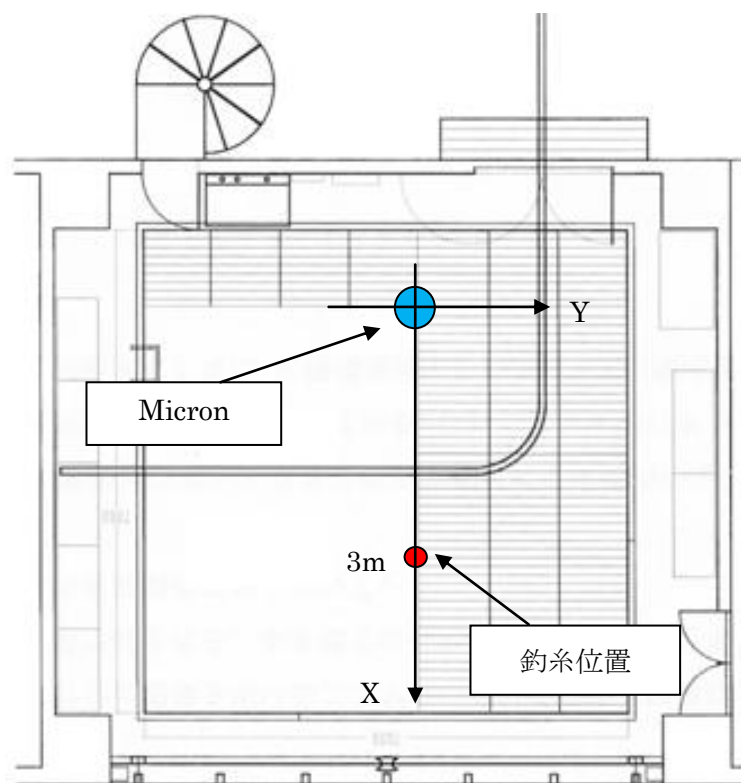


Figure 2.3 Under Water Robot Test Aquarium

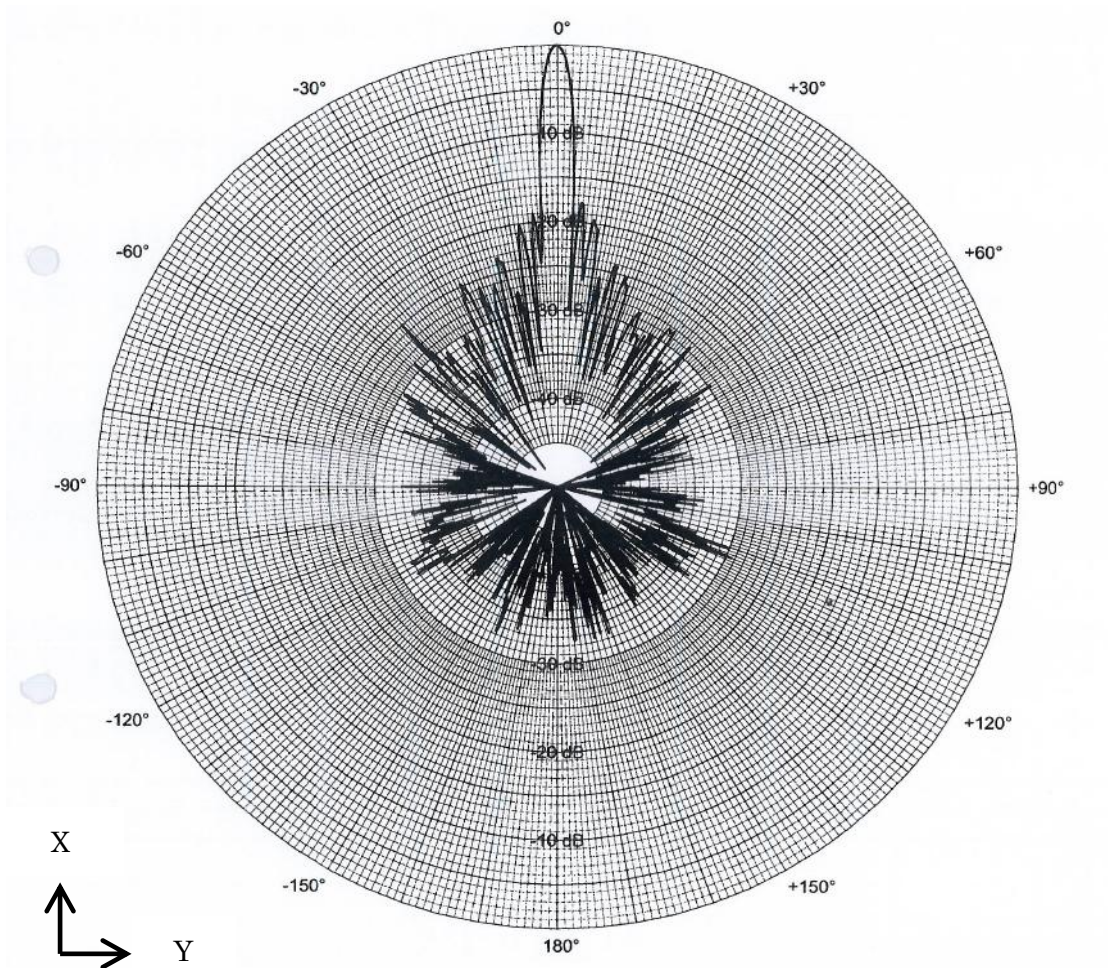


Figure 2.4 Micron Beam pattern X-Y plane dogleg mount

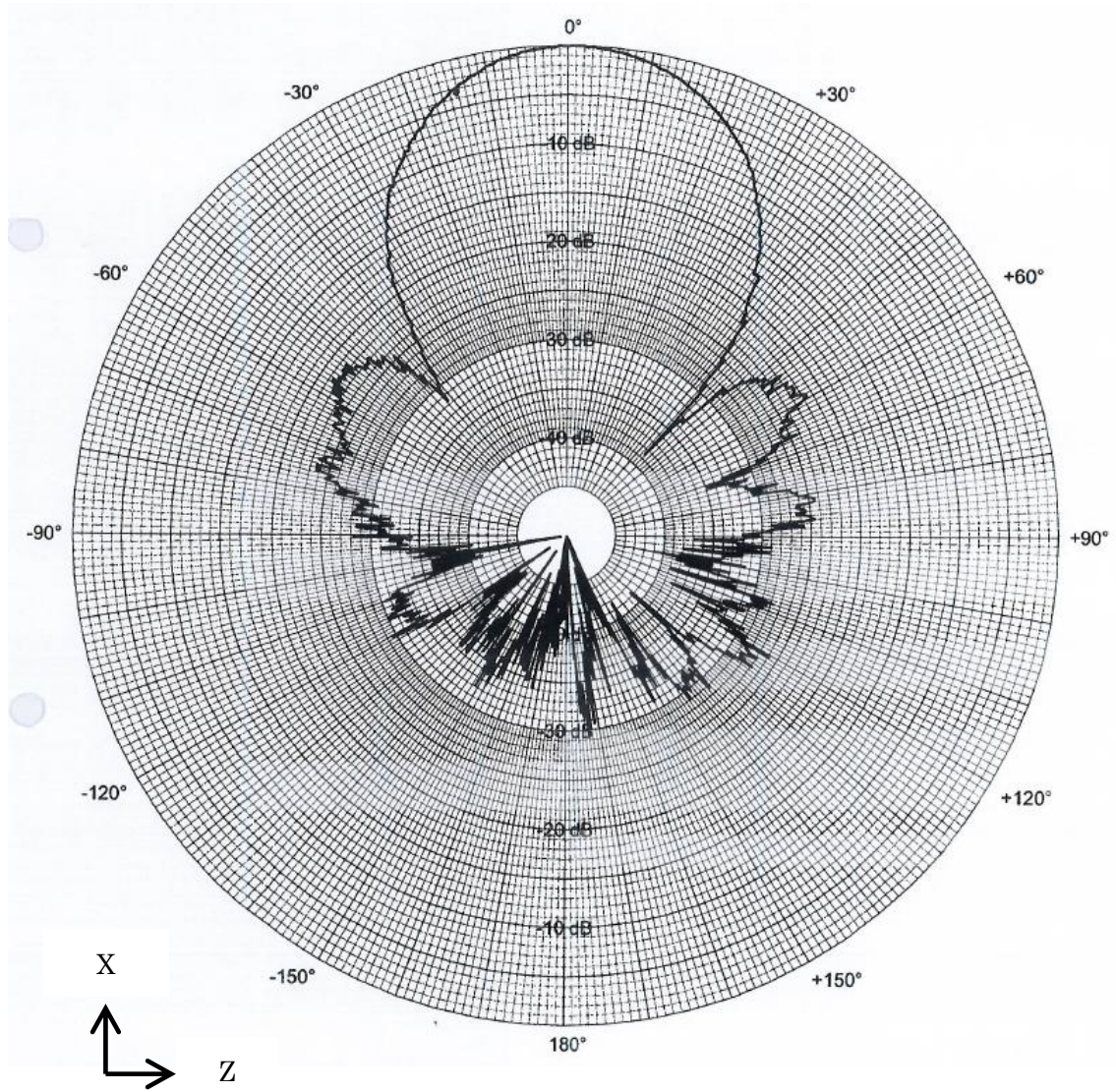


Figure 2.5 Beam pattern X-Z plane dogleg mount

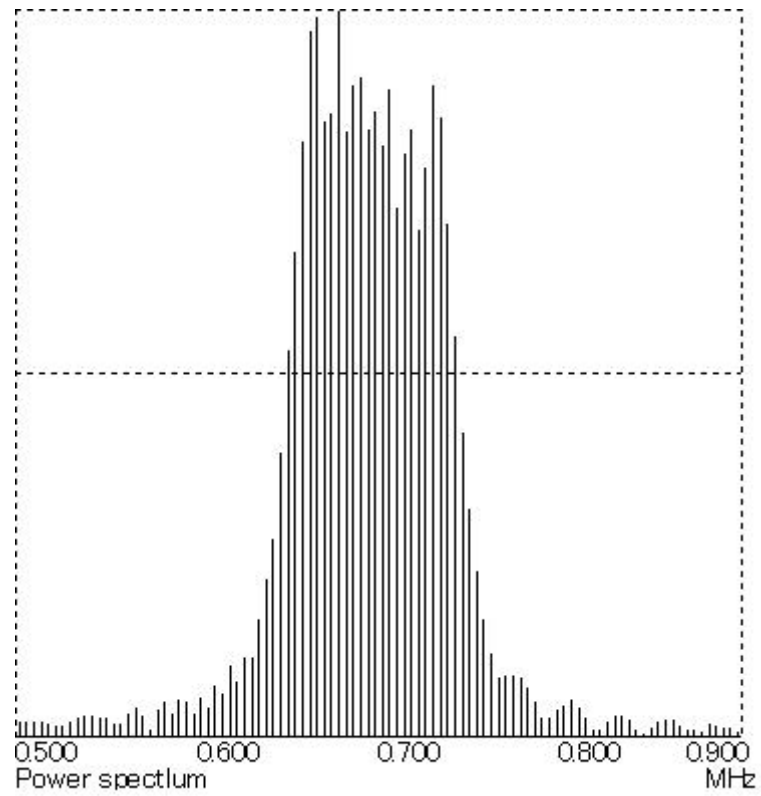


Figure2.6 Micron beam frequency

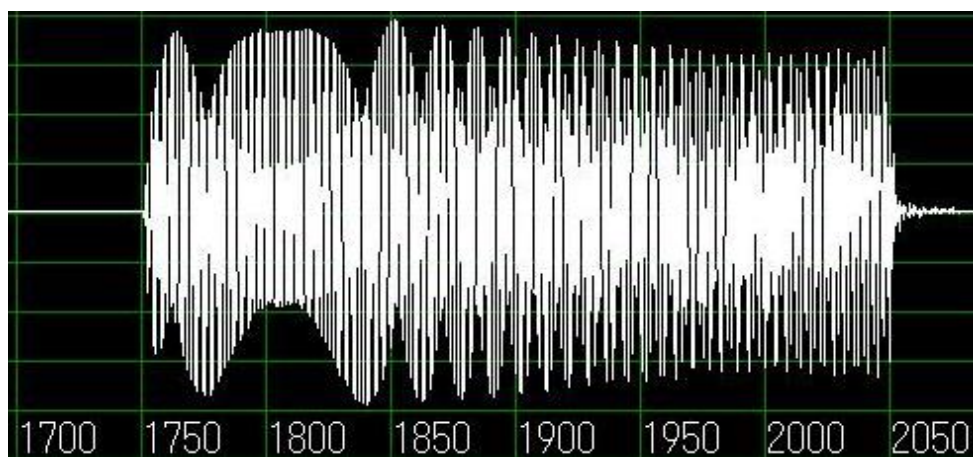


Figure 2.7 Micron beam waveform

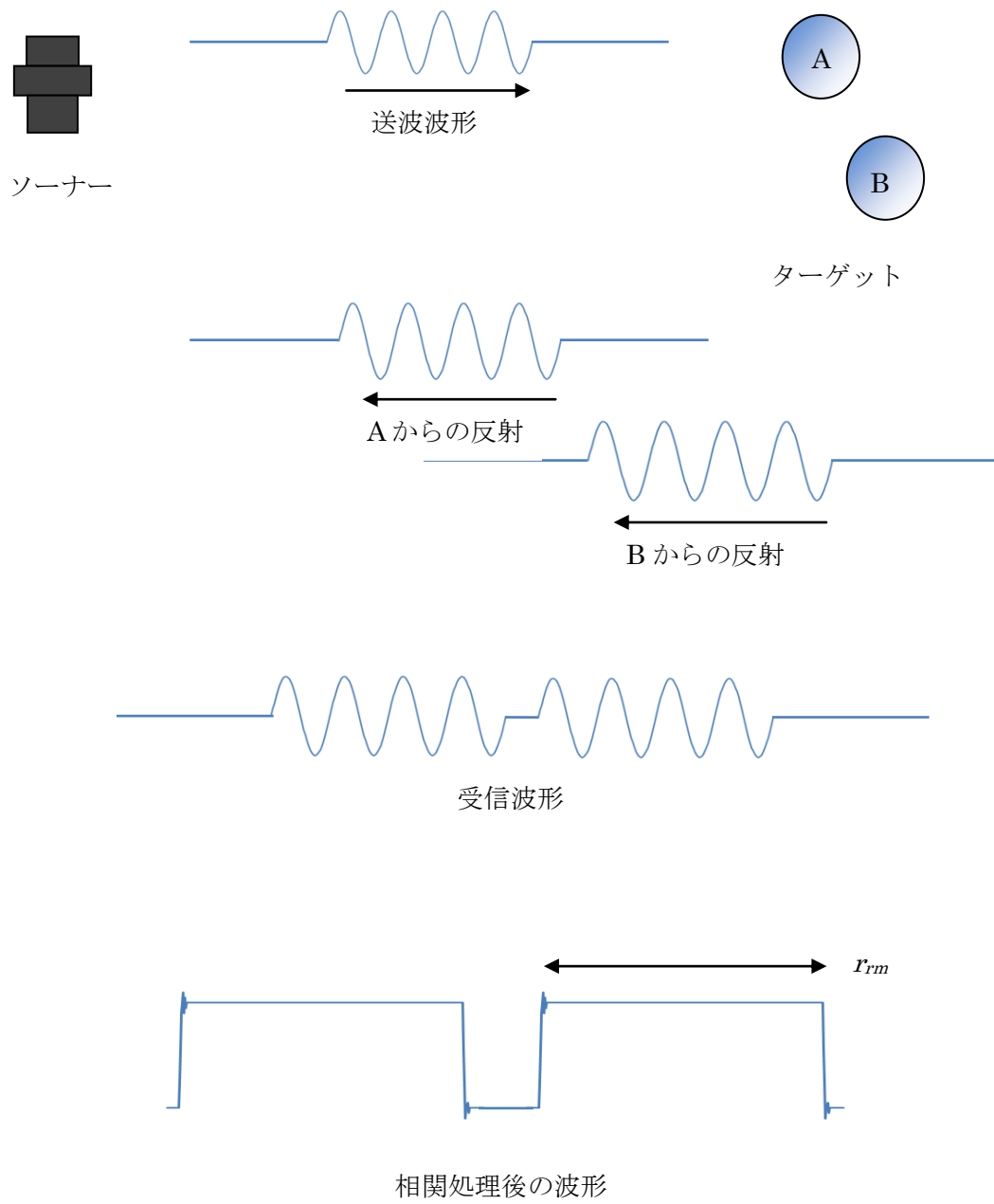


Figure 2.8 Monotonic signal

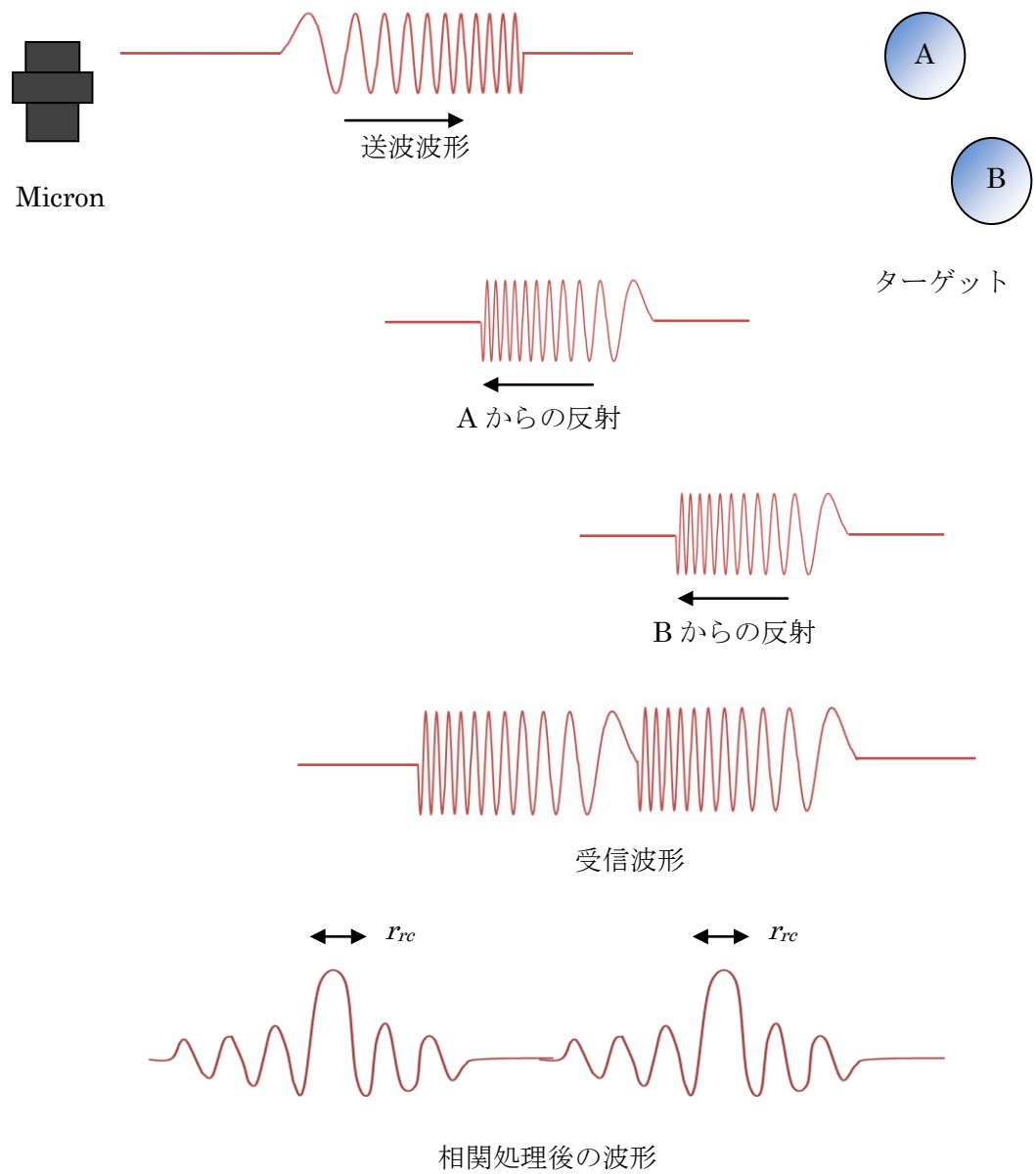


Figure 2.9 CHIRP signal

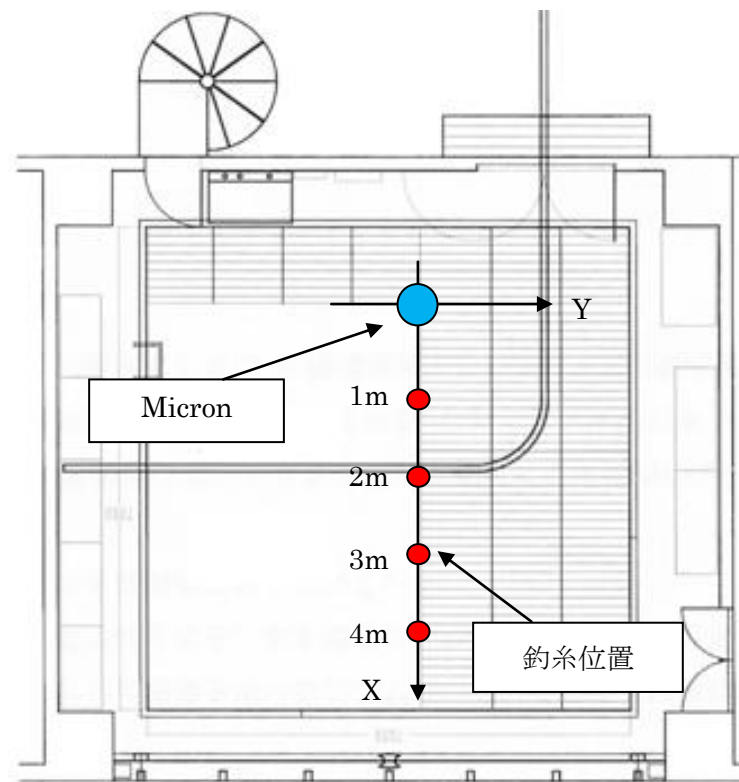


Figure 2.10 Under water robot test aquarium



Figure 2.11 Fishing line

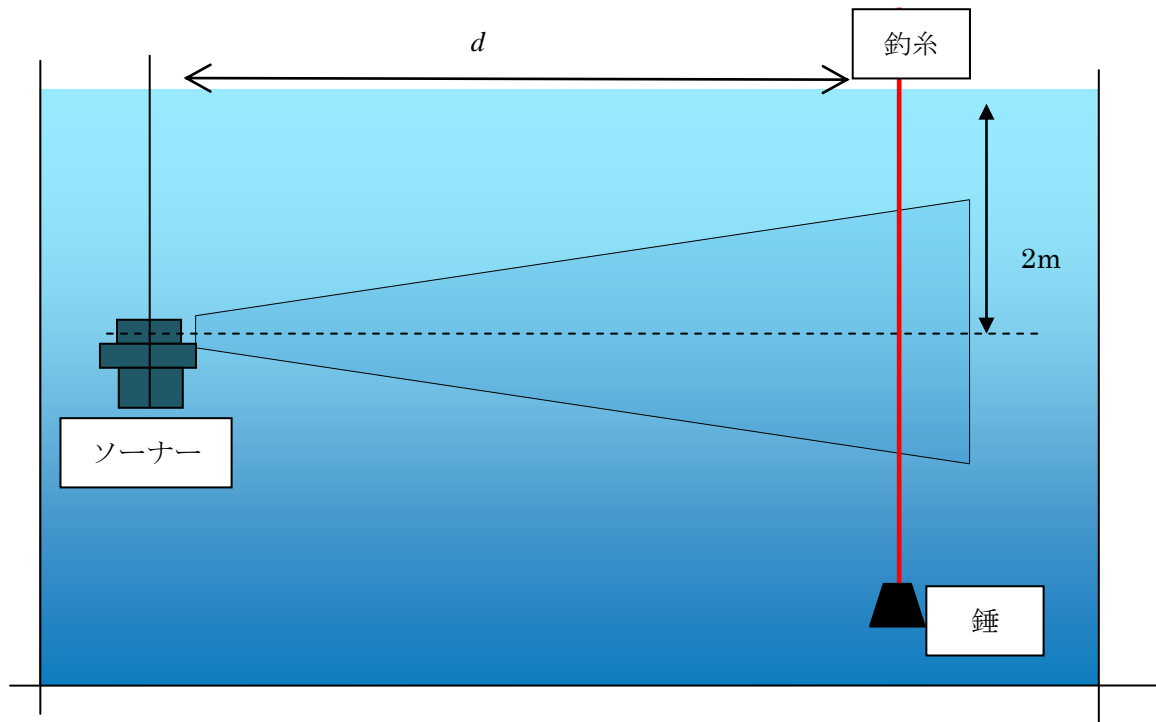


Figure 2.12 Pattern diagram

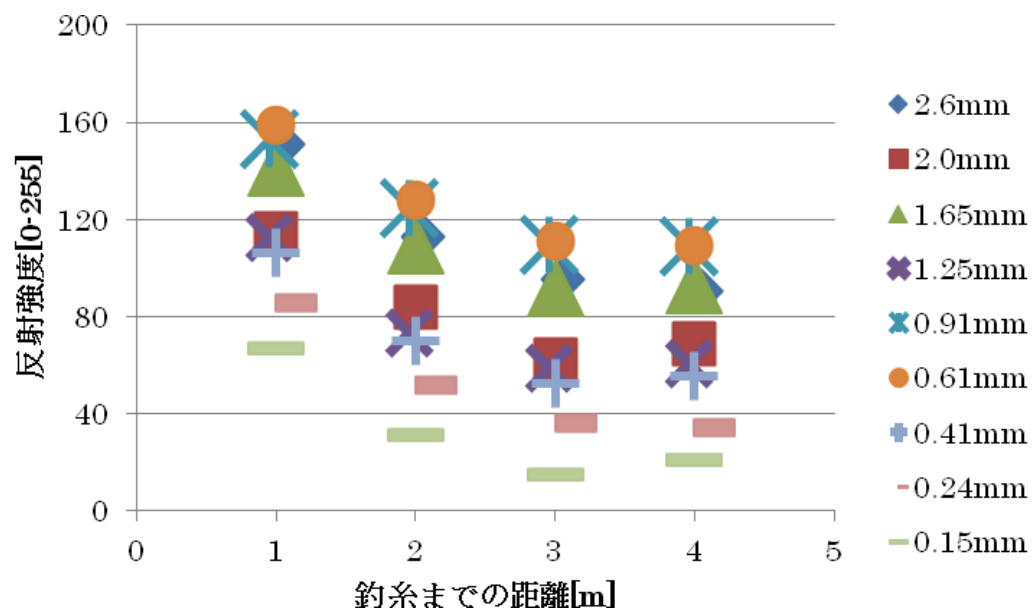


Figure 2.13 Fishing line received levels

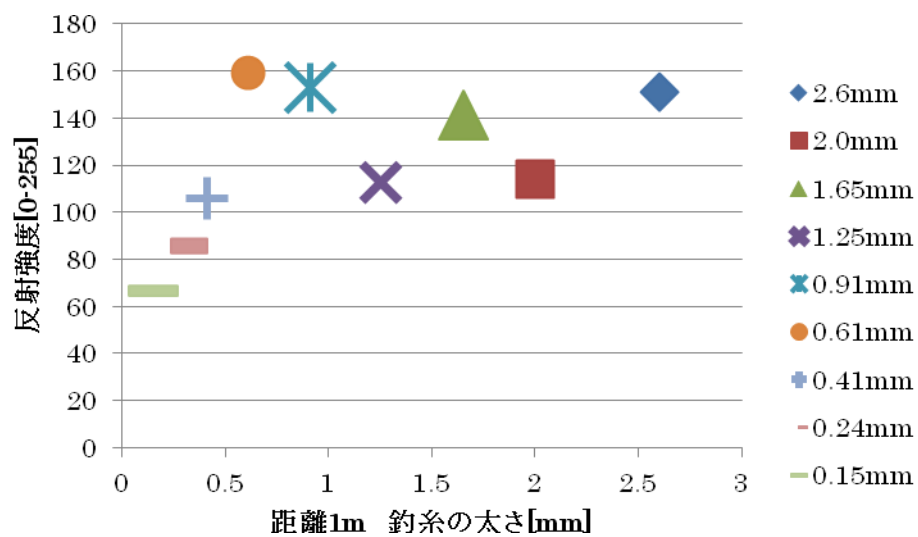


Figure 2.14 Fishing line received levels at 1m

第3章 レーザーとカメラを使った浮遊物探知

3.1 光切断法

本研究では、可視光による探知手法として光切断法を使用する。光切断法とはカメラとシートレーザーを使い非接触で3次元位置を計測する手法である[6]。Figure 3.1 に示すようにカメラに映ったターゲットにシートレーザーを照射する。カメラの画像からレーザーの当たっている位置を認識し、画像上の位置を求める(Figure 3.2)。このとき、レーザーとカメラの相対位置、レーザーの角度よりカメラからターゲットまでの相対位置を計算できる。そして、レーザーの角度を変化させ、カメラの視角全体を探索する。

3.2 ハードウェア

3.2.1 シートレーザーと回転台

本研究では Global Laser 社製のシートレーザー(Figure 3.3)を使用する。このレーザーは照射角度 90[deg]、波長 532nm の緑色のシート状レーザーを出力する。照射方向を変える機能はないため、シートレーザーを回転させるための回転台が必要となる。また、レーザーの回転角度は計測の上では非常に重要なパラメータであるため、回転速度を高精度で制御することが求められる。精度と体積などを考慮した上、サスティナブルロボティクス社産のコンピュータ制御ムービングヘッドパンユニット SPU-01a(Figure 3.4)を採用した。この回転台は小型軽量一体型で、正確なポジションニングが可能な一軸回転台である。RS-232C 経由で位置、速度、加速度などを調整可能である。

これらの機器には防水性がないため、海の中で使用できるように、レーザーと回転台を収納する耐圧容器が必要となる。そのため、先行研究[6]で作成された耐圧ケースを使用する。シートレーザーが回転できる空間を作り、レーザー光を透過させるために、Figure 3.5 に示す透明なアクリルパイプとアルミ製の蓋で構成する円筒状の耐圧容器を使用した。アクリルパイプの内径は 200mm、壁の厚さは 15mm である。また、レーザー光がアクリルの壁に通過するときに歪みが生じないように、レーザーの中心線がアクリルパイプの円心を通すように設置した。上部のアルミ製蓋に水中コネクタを取り付け、水中ケーブルを通して外部のパソコンと通信し、パンユニットの回転を制御する。カメラも Figure 3.6 に示す耐圧ケースの内部に固定し、水中コネクタでパソコンと接続する。

3.2.2 カメラとレンズ

本研究では、光切断法で計測可能な範囲を広げるため、一度に取得する画像の範囲を大きくする必要がある。そのため、カメラとレンズには広い画角が求められる。カメラは POINT GREY 社製の CCD カメラ、Scorpion SCOR-20SO(Figure 3.7)を採用した。耐圧容器の寸法などは Table 3.1 に示す。カメラ画像のキャリブレーションについては、3.4.1 節に述べる。カメラに搭載するレンズは SPEACECOM 社製 H3.5 1.6(Figure 3.8)を採用した。性能、寸法などは Table 3.2 に示す。カメラの水中画角は横 72.9[deg]、縦 58.0[deg]である。

3.3 計測原理

3.3.1 画像処理の流れ

光切断法はカメラからの画像を用いて対象物の 3 次元形状を計測する。対象物にレーザー光が当たった状態で、カメラが撮った写真に対して画像処理を行い、その写真からレーザーのあたった箇所を取り出すことが必要である。本システムでは、レーザー光の画像上のピクセル位置を抽出し、このデータから 3 次元形状を計測する。

画像からレーザー光を抽出するために、画像処理ソフト OpenCV を利用した。計測例として、Figure 3.9 のように前方 1.5m にあるターゲットにシートレーザーを照射し、この画像からシートレーザーのあたっている画像上の位置を求める。画像データは赤緑青(RGB)の三種類の色を組み合わせることで表現されている。閾値=240 として、この画像から RGB の値がそれぞれ閾値以上のピクセルを白、それ以下のピクセルを黒として 2 値化したものが Figure 3.10 になる。つぎに、Figure 3.11 のように縦 100 分割、横 100 分割の領域に分割し、それぞれの画像で白ピクセルの重心位置を求める。この重心位置が求めたいレーザー光の画像上の位置になり、Figure 3.12 のように点群データを得ることができる。本システムでは、画像取得の時間を削減するため、グレースケールの画像を使用する。

3.3.2 2 値化処理

2 値化処理では、閾値を固定することで望ましいデータを取ることができない場合がある。実海域では、日光や耐圧ケースから漏れたレーザー光などによりにムラができてしまうことが考えられる。Figure 3.13 は一つの例であるが、人間には簡単にターゲット(この場合 ABC)を認識できるが、固定された閾値では Figure 3.14,3.15 のように正しく 2 値化できない。

そこで、本研究ではこのような問題に対応するため、2 値化処理に動的閾値法を使用する。動的閾値法では画像のピクセルに対して、周辺ピクセルとの差を閾値とする方法である。Figure 3.16 のグラフは、対象となる画像の明暗を表わしており、各ピクセルごとに周囲のピクセルとの平均値を求める。そして一定の値を閾値として、元画像から移動平均と閾値を引いた値を 2 値化する。本研究では(3.1)で単位ピクセルに対する平均値を求める。ここで f は対象ピクセルのグレースケール値、 l_w, l_h は対象ピクセルとする領域の縦ピクセルと横ピクセルとし、領域の合計値を F とする。

$$f = \frac{F}{lh \times lw} \quad (3.1)$$

次に平均画像(Figure 3.17)から元画像の値を引き Figure 3.18 のような画像を求める。次にこの画像から閾値以上のピクセルを 2 値化することで、Figure 3.19 のような望ましい結果が得られる。

3.3.3 計算手順

Figure 3.1 に示すように、画像上でレーザー光が当たったピクセルを p とする。画像中心に 0 点(0,0)を配置し、 p 点の位置を(v, w)と表わす。ここで、 v_c と w_c は画像縦幅と横幅の半分の値とする。ここでカメラの縦画角を ϕ_c 、横画角を θ_c と表すと光学系の主点から p 点の位置(u, v)の角度 θ, ϕ を(3.2)、(3.3)で求めることができる。

$$\tan \theta = \frac{\tan \theta_c}{w_c} v \quad (3.2)$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \phi_c}{u_c} u \quad (3.3)$$

つぎに Figure 3.2 のように、シートレーザーとカメラの角度が α のときに p 点からカメラまでの距離(x, y, z)がカメラの画像上の点 $p(u, v)$ から(3.3)、(3.4)、(3.5)のように求められる。 θ_c, ϕ_c はカメラの水中画角の半値、 y_L はレーザーの回転中心からカメラの中心、 α はレーザーの照射方向と z 軸との角度である。

$$x = \frac{y_L \tan \alpha}{\tan \phi \tan \alpha - 1} \quad (3.3)$$

$$y = x \tan \theta \quad (3.4)$$

$$z = x \tan \phi \quad (3.5)$$

α の値を変化させ、カメラ画角の範囲をスキャンし画像を取得する。計測結果はカメラの光学系中心を原点として X,Y,Z の 3 軸の数値として出力される。

3.4 予備実験

3.4.1 キャリブレーション

水中にカメラを入れると水とレンズの境目で光の屈折率が変化するため、視角が狭まり画像に歪みが生じ、計測結果に誤差が発生する。この歪みにはカメラ独自の特徴があるため、コンピュータによる画像処理で歪みを削減することが可能とされる。本研究では、OpenCV の公式サイト[7]に掲載されているプログラムを使用し、歪み補正を行った。具体的には、Figure 3.20 のような白黒の正方形で構成されるチェッカーボードと呼ばれる板をカメラで複数回撮影し、プログラムで処理することで、歪み補正のパラメータを求める。歪み補正の効果を Figure 3.21,3.22 に示す。カメラからの距離 1.5m の位置に取り付けられたターゲットを光切断法で計測した。キャリブレーションなしの場合、ターゲットまでの平均距離=1.522m であるのに対し、キャリブレーションありでは平均距離=1.519m となった。

3.4.2 実験

ソナーと同様、X 軸方向に 1m から 4m まで 1m 間隔で距離を変化させ、計測を行った。Figure 3.22 に太さ 0.24mm の釣糸を 1m の位置につり下げカメラから取得した画像を示す。シートレーザーの移動角度を 90[deg]から 130[deg]とし、1 度あたり 1 枚の画像を取得する。本実験では、カメラによる計測時間削減のため、800×600 ピクセルの

グレースケール画像を取得するよう設定した。色彩を調節した画像を Figure 3.23 に示す。釣糸に照射されたレーザーと壁面に当たったレーザーが見える。Figure 3.24 を動的閾値法で2値化した画像を Figure 3.25 に示す。オフセットの値は 30 とした。次に画像処理によって浮遊物として認識されたピクセルの重心を Figure 3.26 に示す。釣糸の他にも、ノイズが認識されている。

3.5 結果

計測結果を Figure 3.27 から Figure 3.34 に示す。このグラフでは横軸と縦軸の交点を実験装置位置とし、横軸は Y 軸方向、縦軸は X 軸方向の距離を示している。太さ 0.15mm の釣糸は距離 4m 以上では、計測不可能である。また、水中の微粒子と思われる物体にレーザーが当たり、ノイズとして計測されている。それ以外にも壁面に固定された金属製のボルトは光を反射しやすいため、レーザーが直接当たらない状態でも光るため、ノイズの原因となっている。太さ 2.6mm の釣糸では、釣糸の後にノイズが多数計測されているが、これは距離が近いためレーザーの当たった箇所以外でも釣糸が光り、計測されているためである。

3.6 考察

ノイズは釣り糸から離れた位置に出現しているため、画像領域を絞り込むことで精度を向上できる可能性がある。また、ソナーの計測結果と比較することで、ソナーのノイズ、光切断法のノイズを分離し計測の精度を向上させる可能性が考えられる。

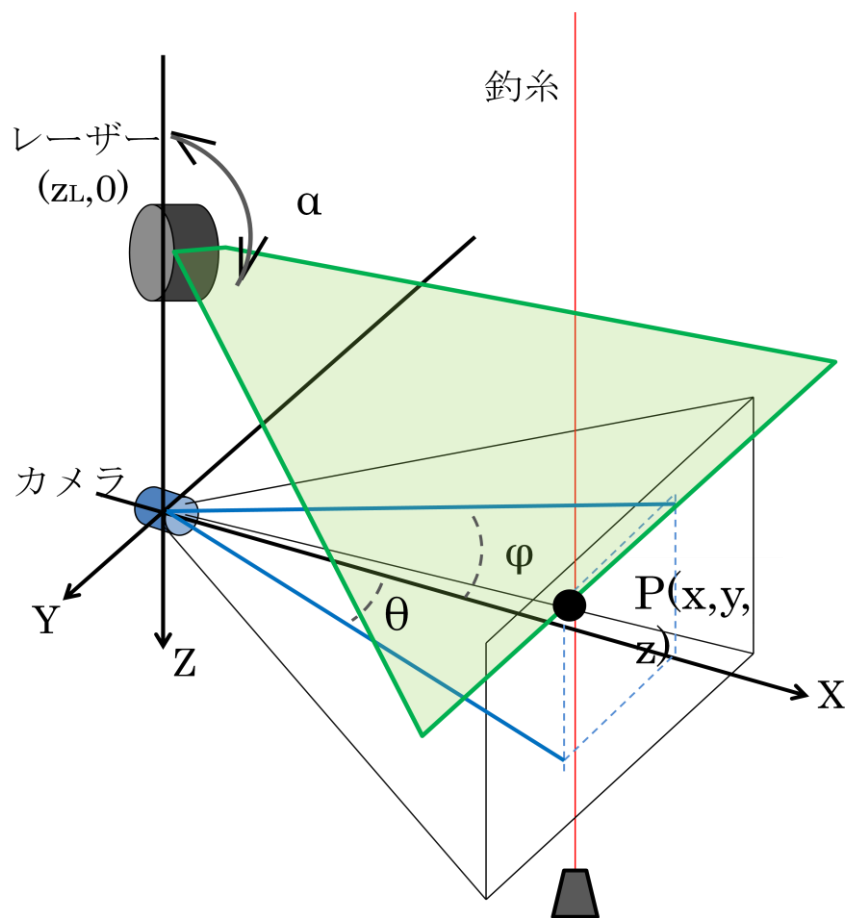


Figure 3.1. Light sectioning method

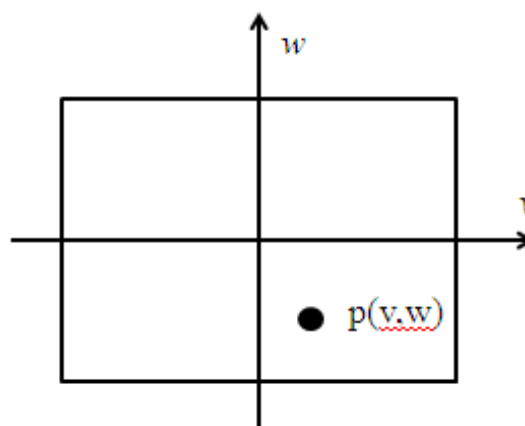


Figure 3.2 Camera image



Figure 3.3 Seat laser [8]

Table 3.1 Specifications of Machine Vision Laser

型番	GreenLyte-MV-Excel Machine Vision Laser
重量	70[g]
直径	19[mm]
全長	110[mm]
レーザー周波数	532E-9[m]
照射角	90[deg]
作動電圧	12[V]
作動環境温度	5～35[°C]



Figure 3.4 Pan Unit SPU-01a[9]

Table 3.2 Specifications of Pan Unit SPU-01a

型番	SPU-01a
最大搭載重量	3[kg]
最大角度分解能	0.0015[deg]
最大速度	90[deg/s]
パンレンジ	± 175 [deg]
重量	750[g]
寸法	59×75×110[mm]
作動環境温度	0～40[°C]

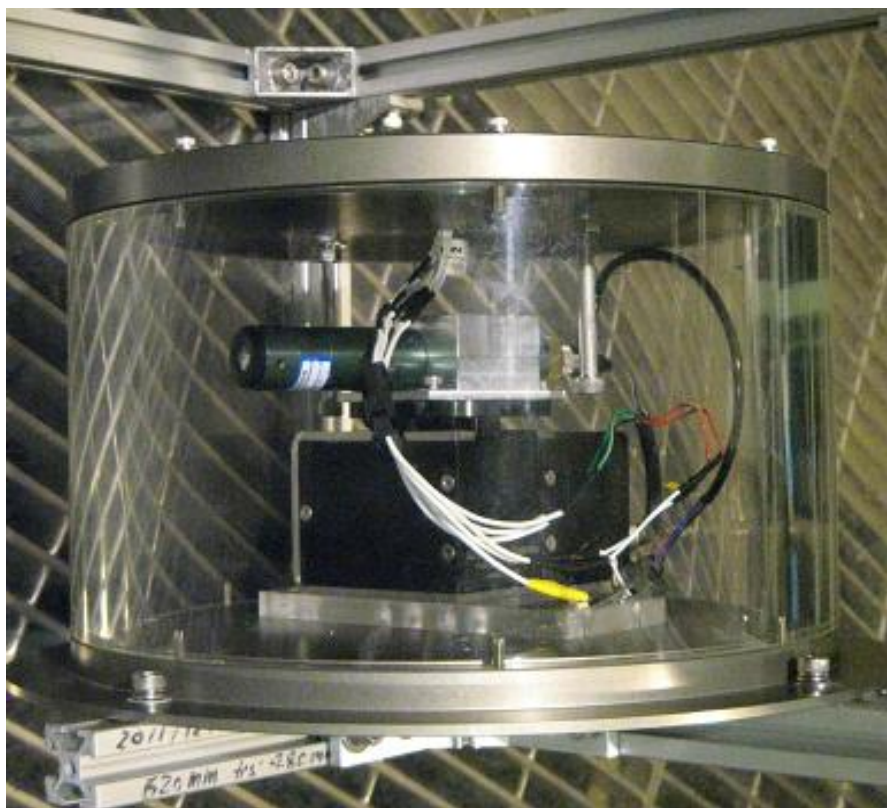


Figure 3.5 Pan-unit and laser in case



Figure 3.6 Camera in case

Table 3.3 Dimension of camera case

直径	32[mm]
全長	153.5[mm]
耐圧深度	3000[mm]
空中重量	2.3[kg]
水中重量	1.7[kg]

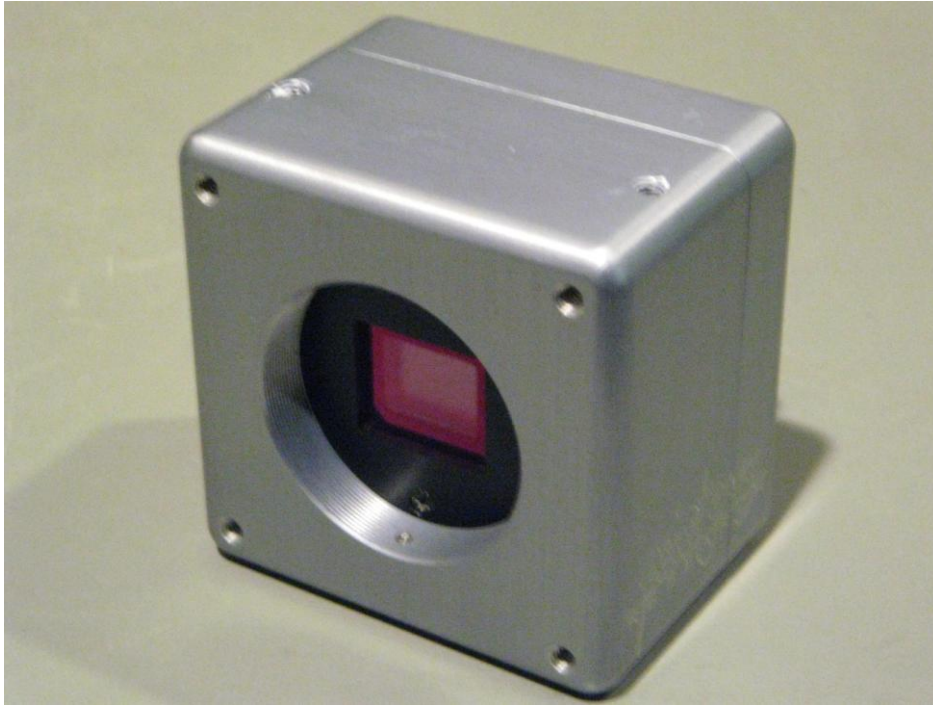


Figure 3.7 Scorpion SCOR-20SO

Table 3.4 Specification of Scorpion SCOR-20SO

型番	SCOR-20SO
重量	125[g]
Size	50 × 50 × 40[mm]
Imager	Sony ICX274 1/1.8" CCD sensor 1600 × 1200 BW of Color Progressive scan Global shutter
Pixel size	4.4E-6 × 4.4 E-6[m]
Frame rates	1600 × 1200 at 14FPS 640 × 480 at 21FPS
Format	8-bit or 16-bit 12-bit AtoD
S/N ratio	Greater than 50dB
Shutter	110E-6 ~ 70E-3[s]
Gain	0-25d[dB]



Figure 3.8 SPACECOM H3.5 1.6

Table 3.5 Specification of H3.5 1.6

焦点距離	3.5[mm]
最大口径比	1:1.6
絞り	F1.6～Close
包括角度	84.9×68.9[deg]
最大画面寸法	6.4×4.8[mm]
至近距離	0.1m
バックフォーカス	11.45[mm]
フランジバック	17.526[mm]
操作方法	フォーカス :手動 アイリス :手動
作動温度範囲	-10～50[°C]
直径	45[mm]
全長	37.5[mm]
質量	65[g]

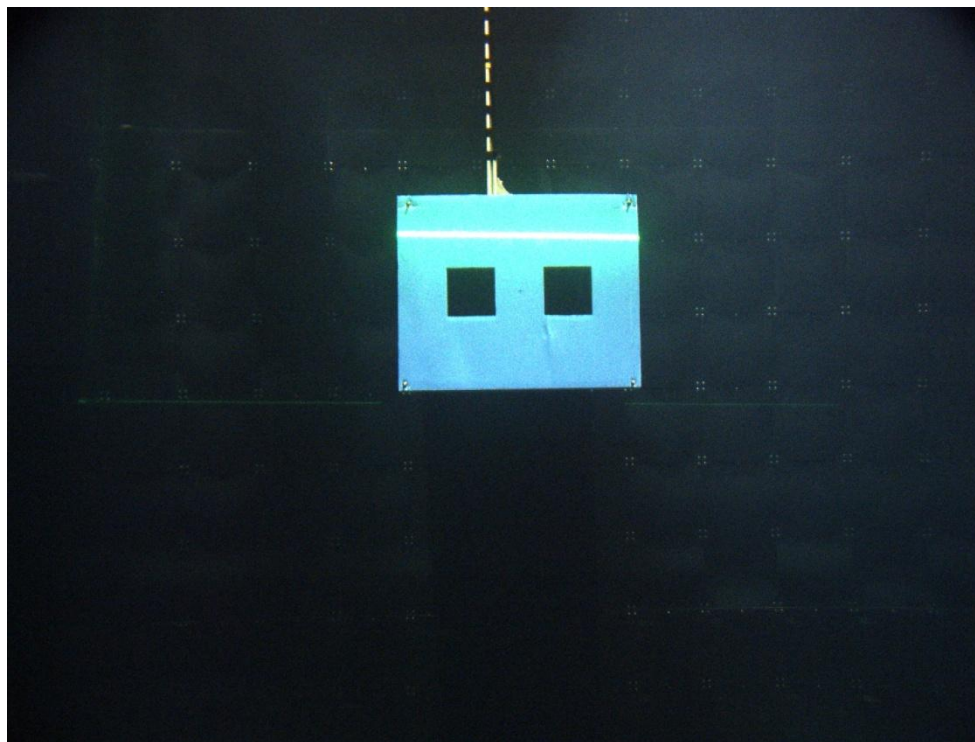


Figure 3.9 Original image 1

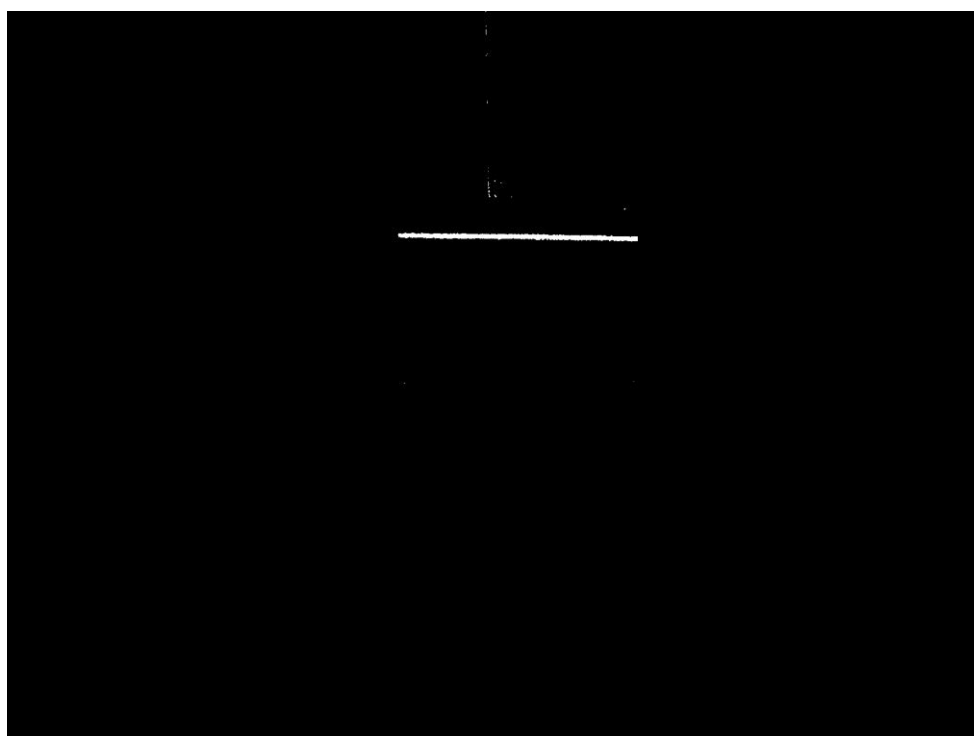


Figure 3.10 Binarized image

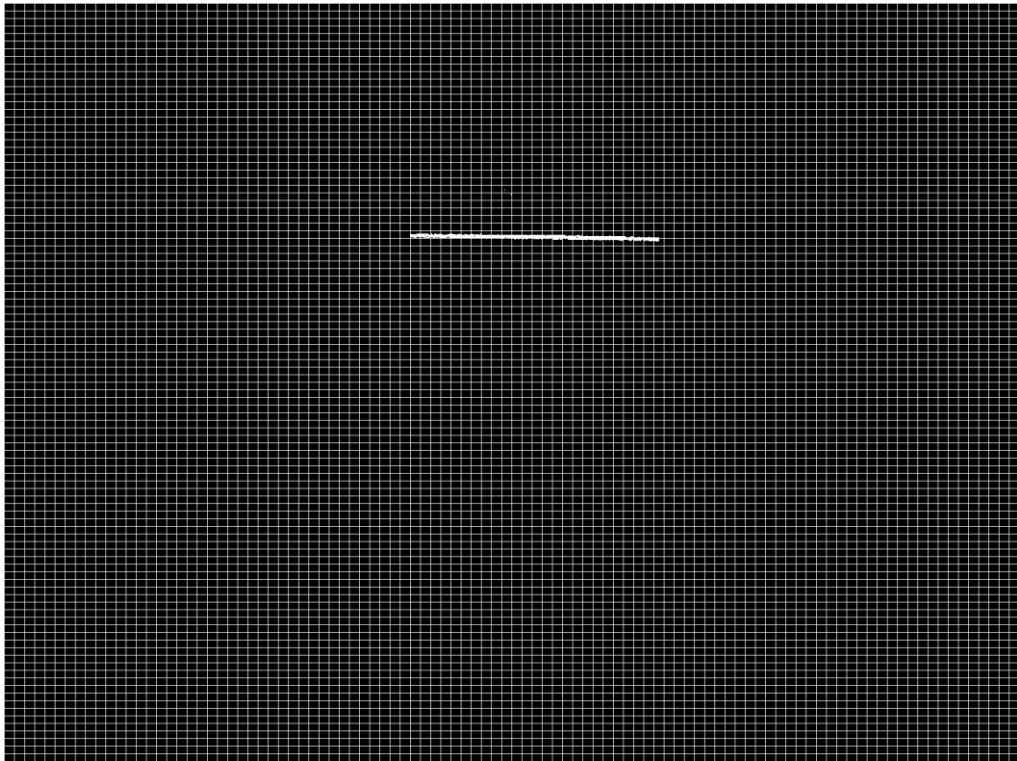


Figure 3.11 Divided image 1

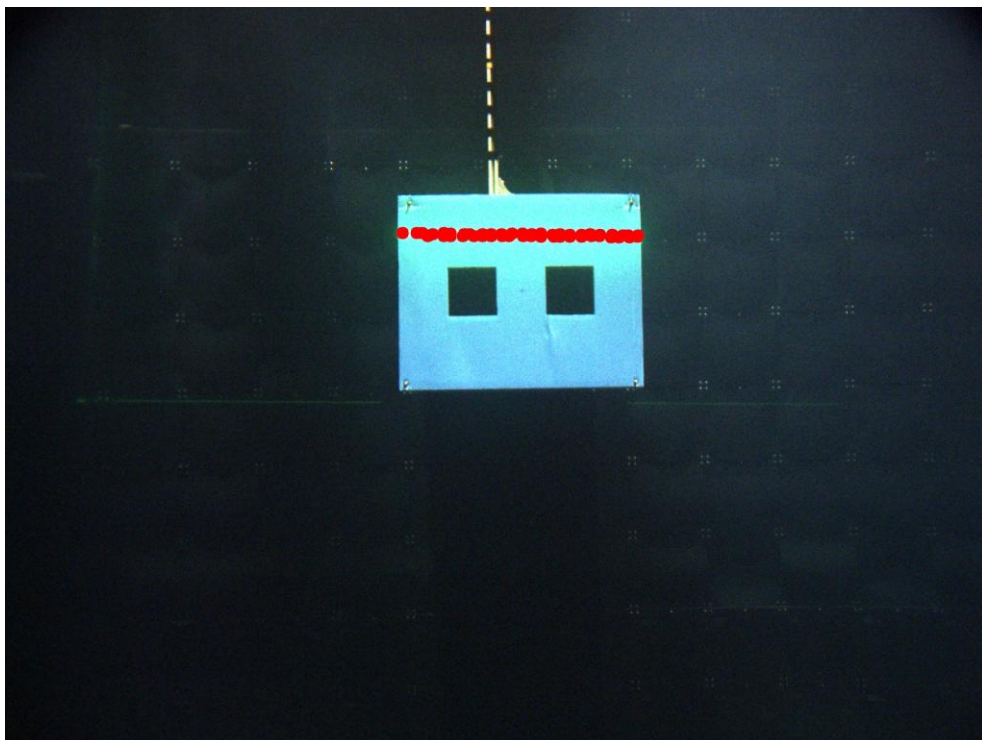


Figure 3.12 Original image and points

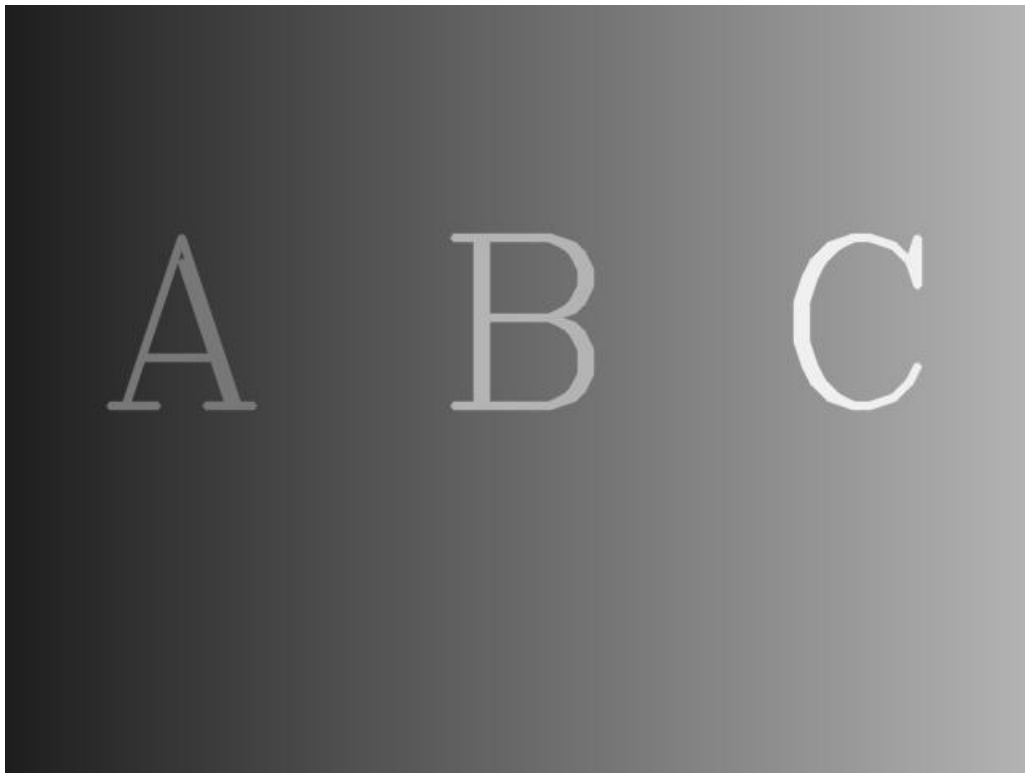


Figure 3.13 original image 2



31

Figure 3.14 Threshold=170

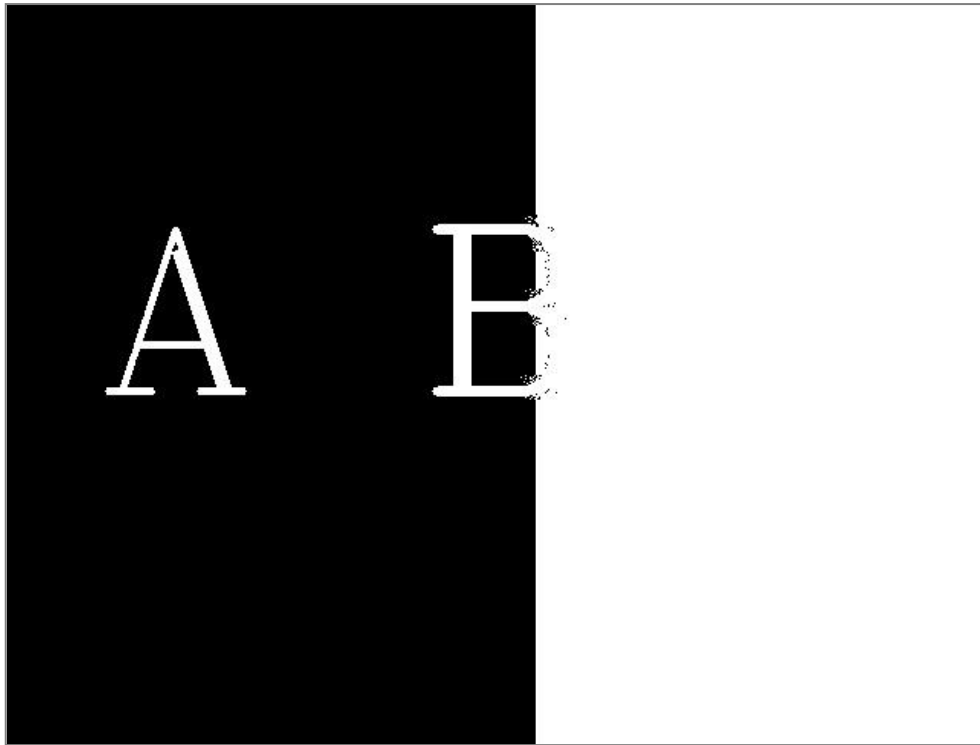


Figure 3.15 threshold=110

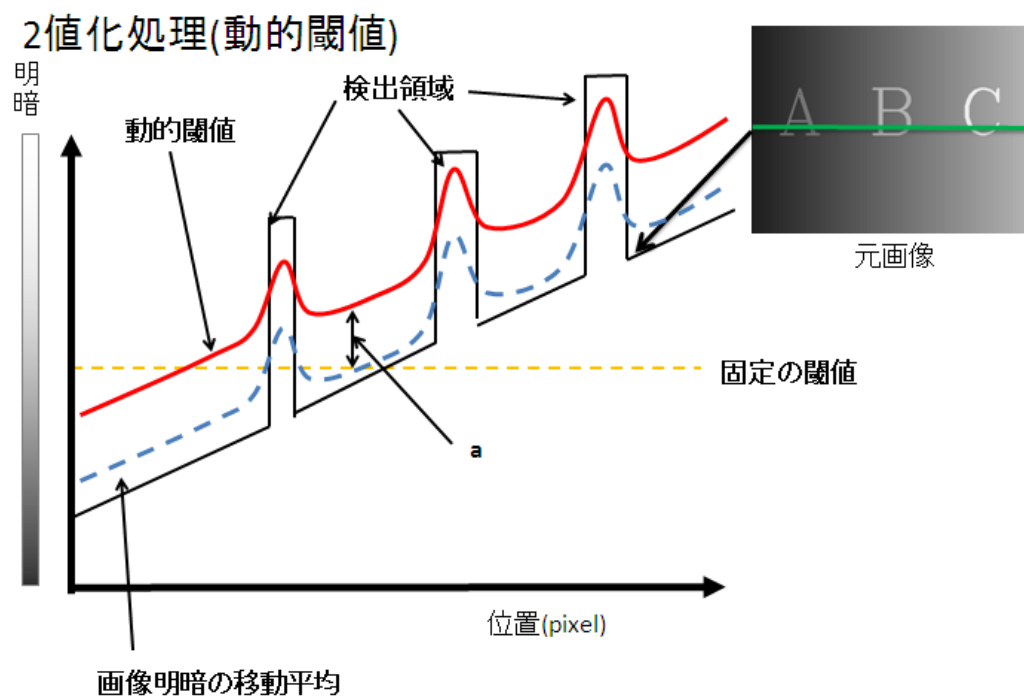


Figure 3.16 Pixel value graph



Figure3.17 Averaged image



Figure 3.18 Subtracted image



Figure 3.19 Result image

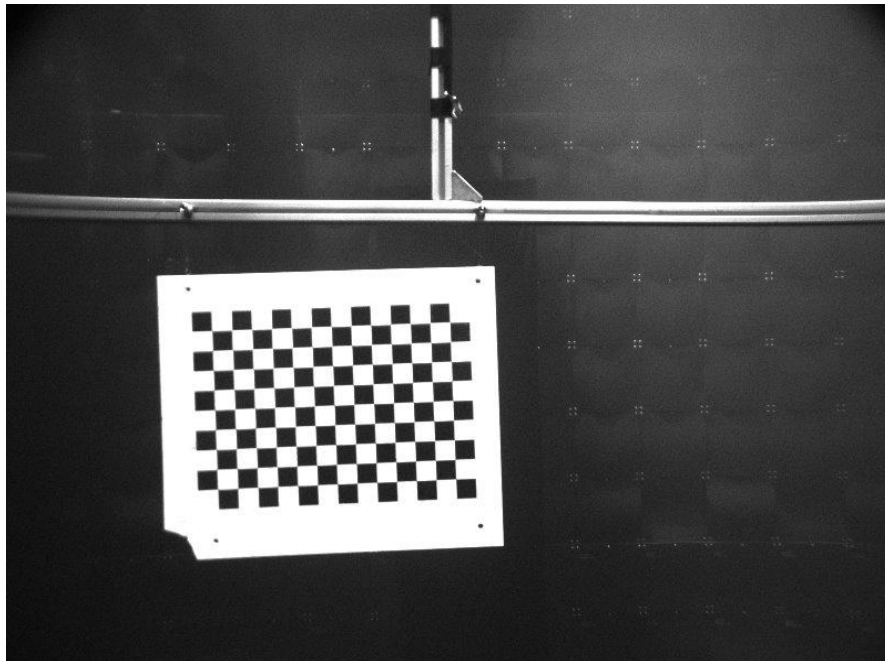


Figure 3.20 Checkerbord

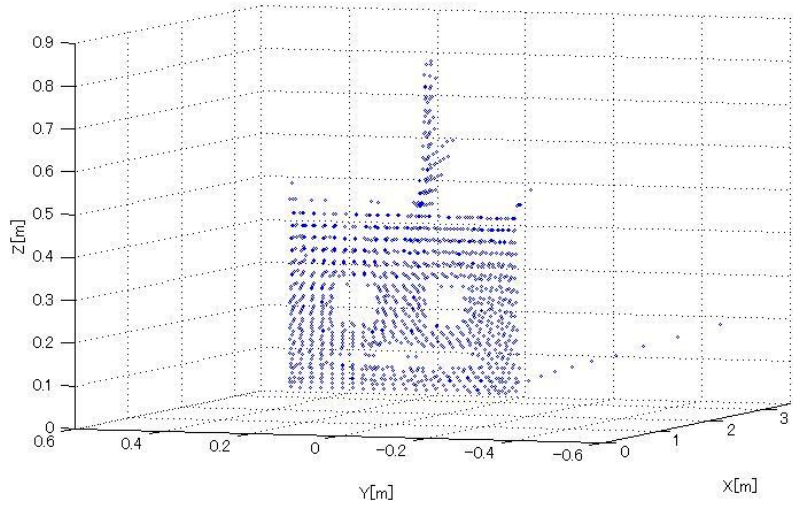


Figure 3.22 No calibration

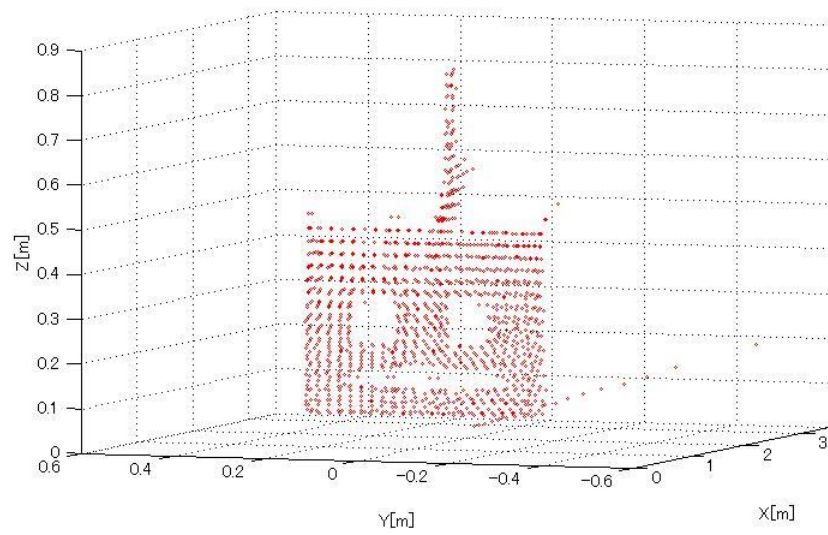


Figure 3.22 After calibration

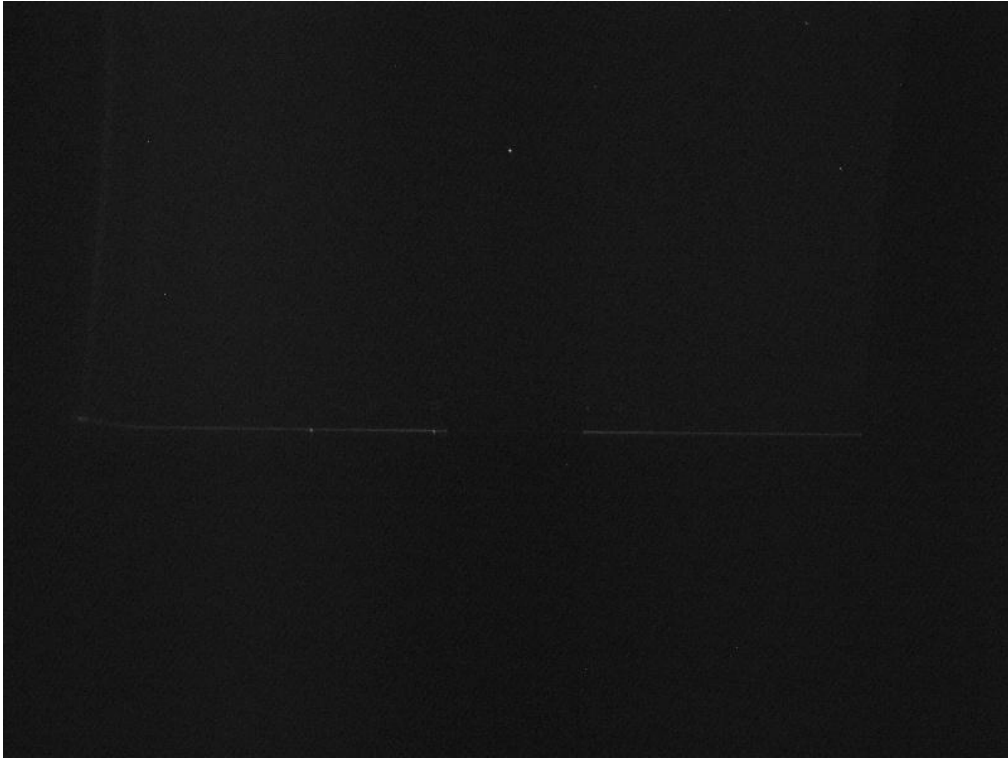


Figure 3.23 Fishing line 0.24mm range=1m

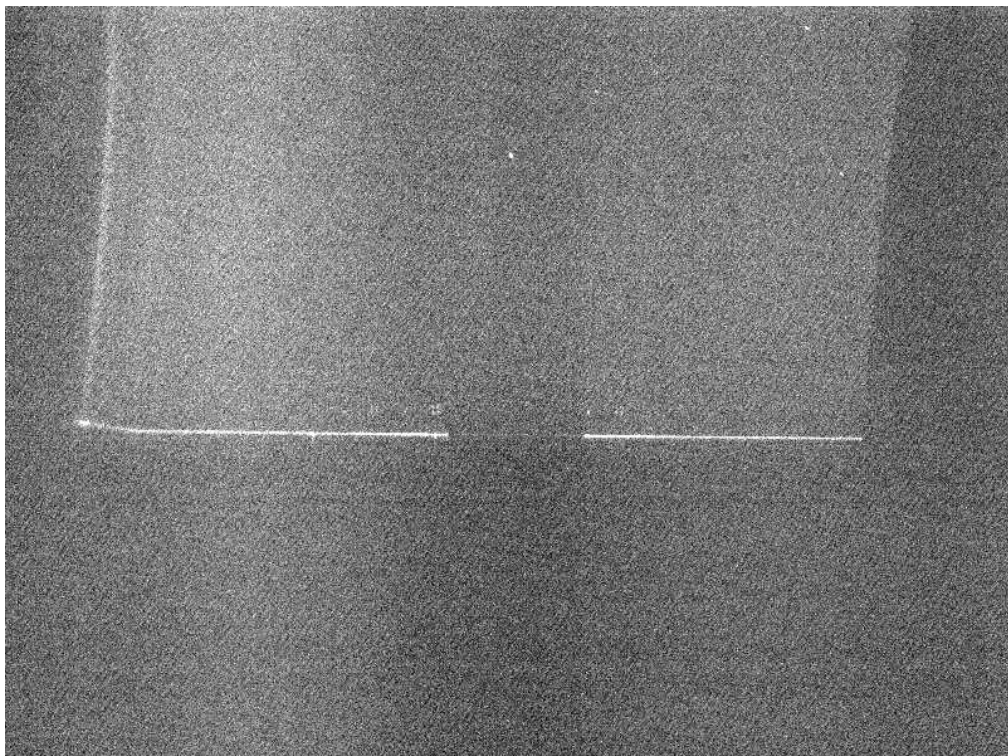


Figure 3.24 Adjusted image



Figure 3.25 Binarized image

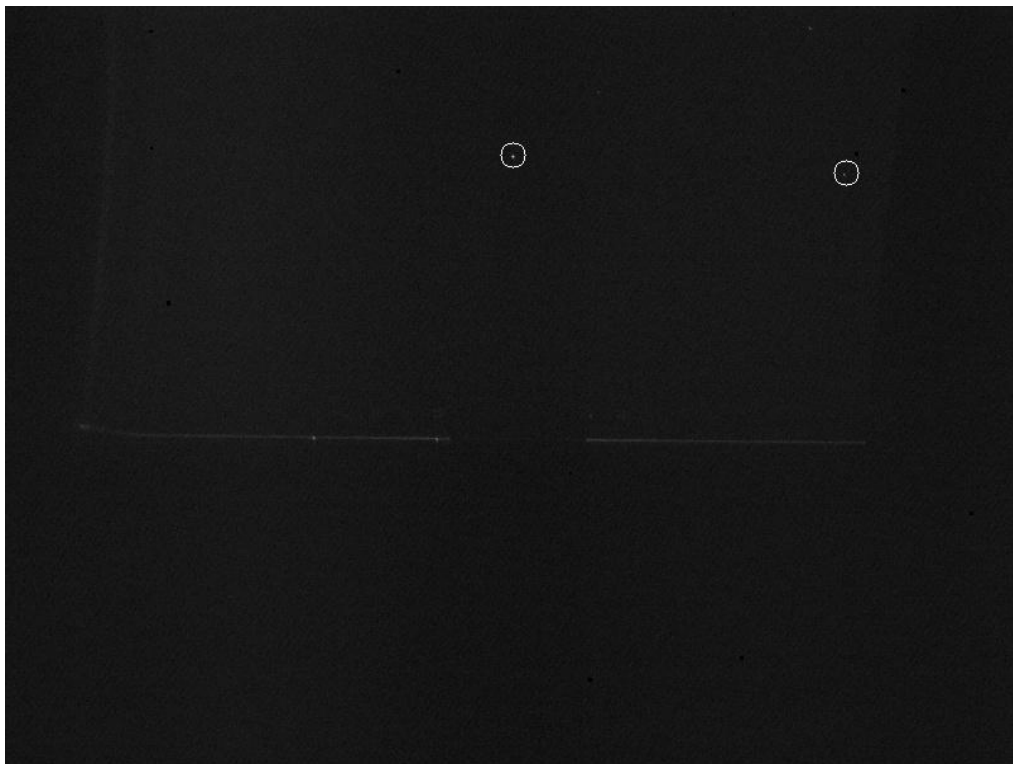


Figure 3.26 Object positions

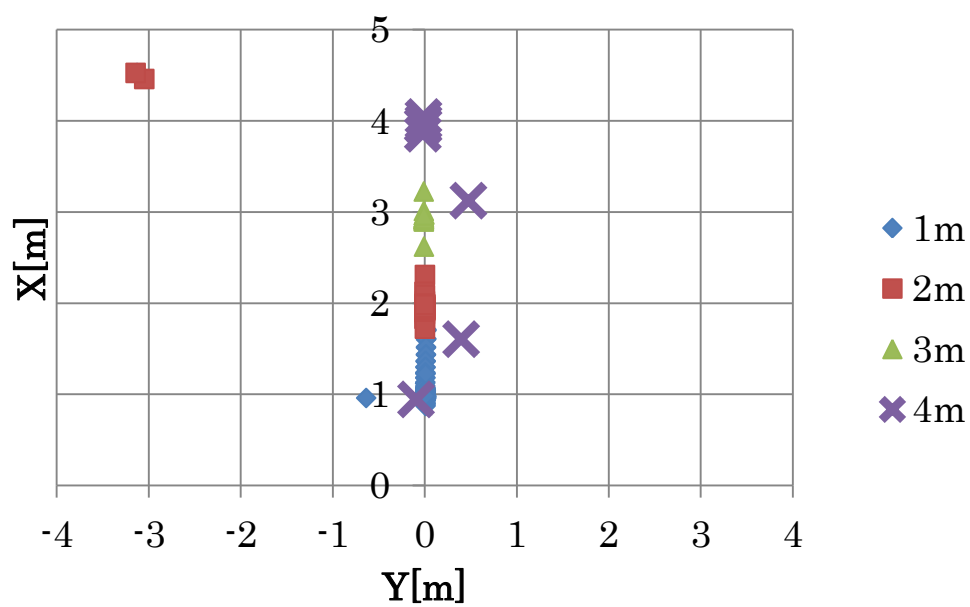


Figure 3.27 Fishing line 2.6mm

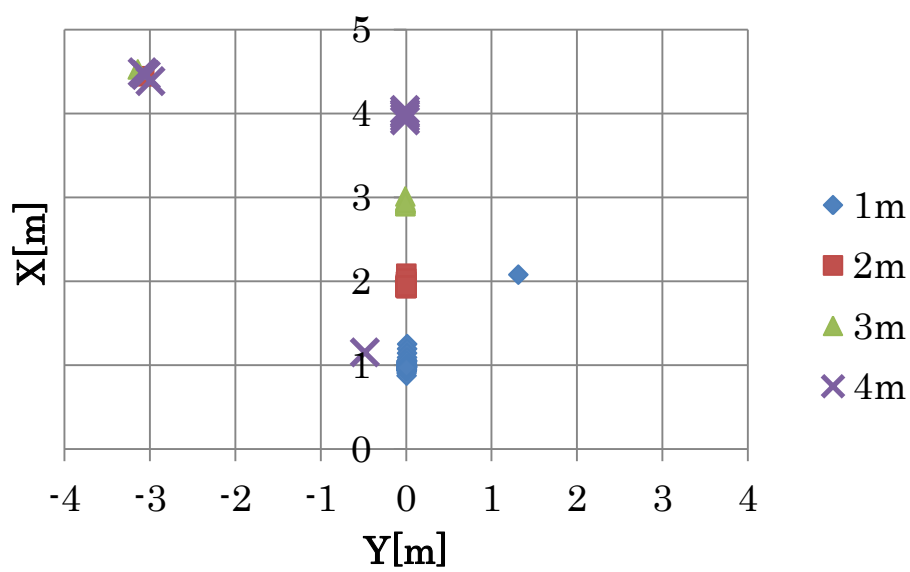


Figure 3.28 Fishing line 2.0mm

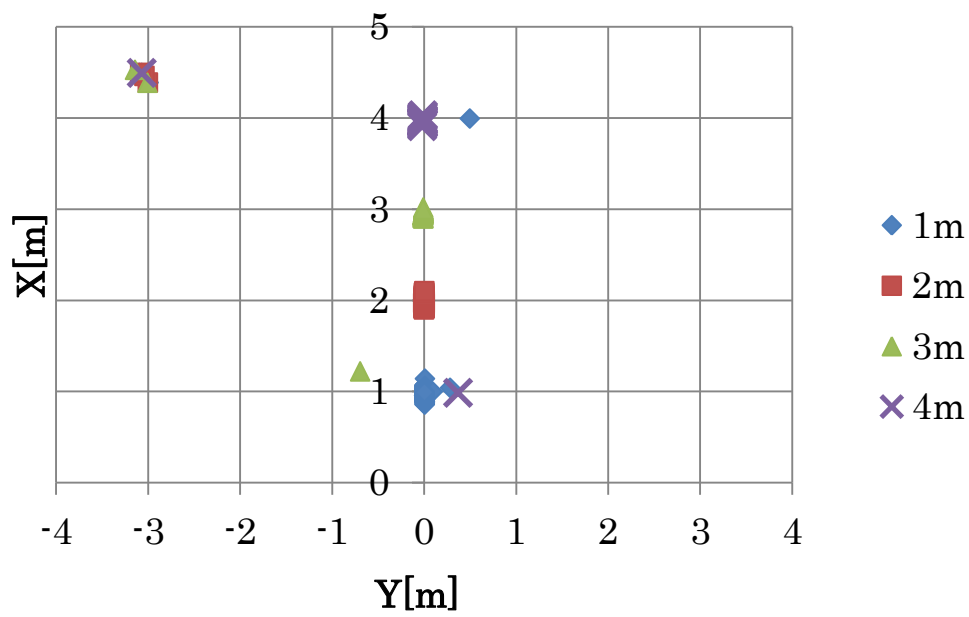


Figure 3.29 Fishing line 1.65mm

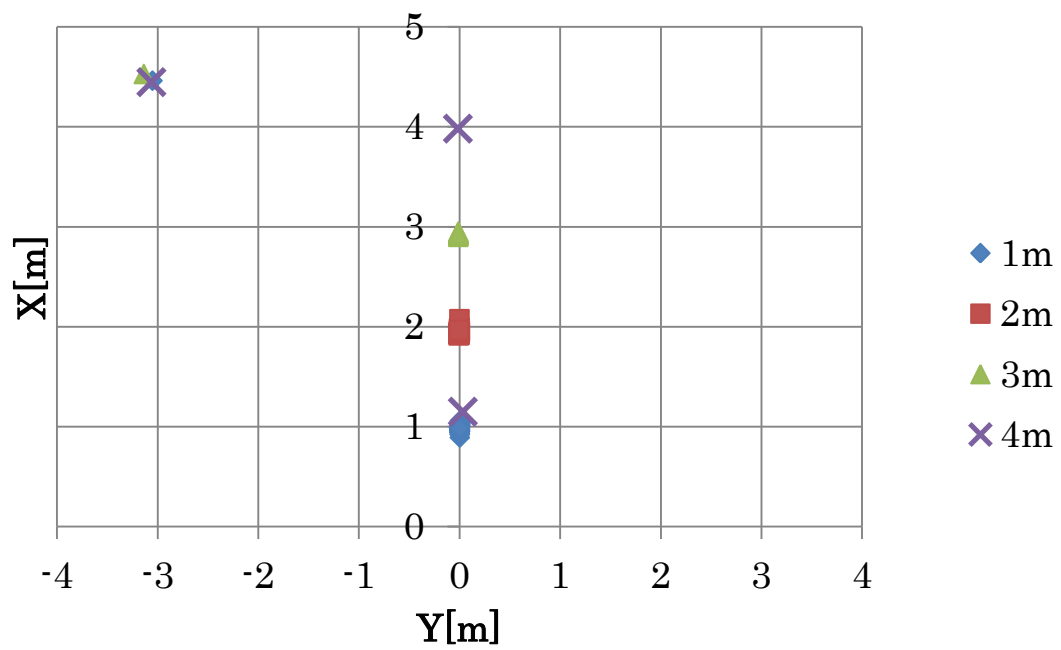


Figure 3.30 Fishing line 1.25mm

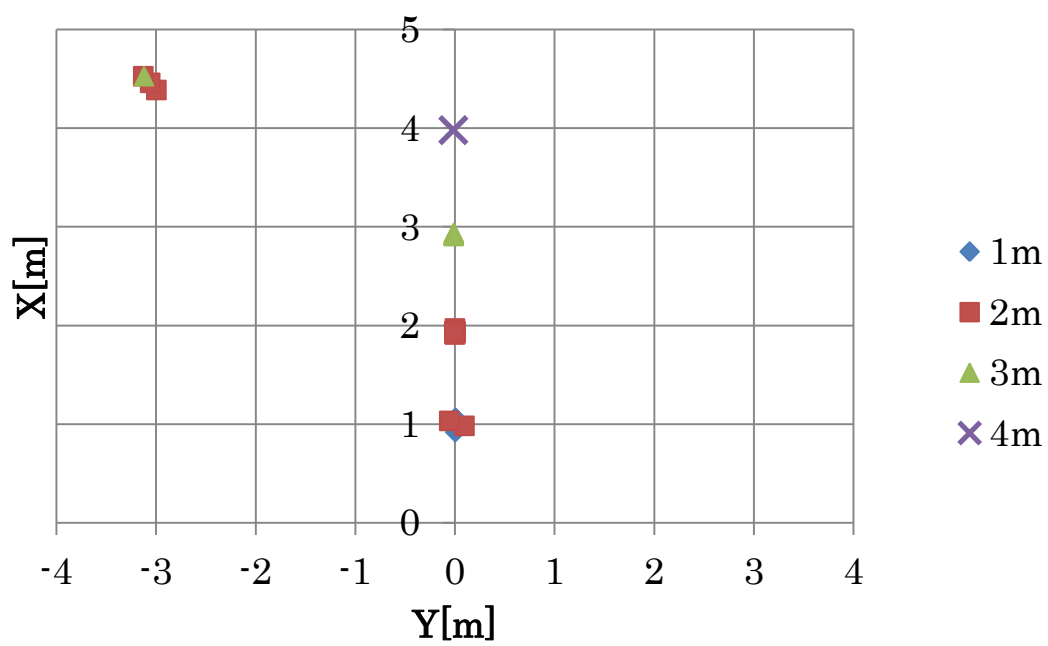


Figure 3.31 Fishing line 0.91mm

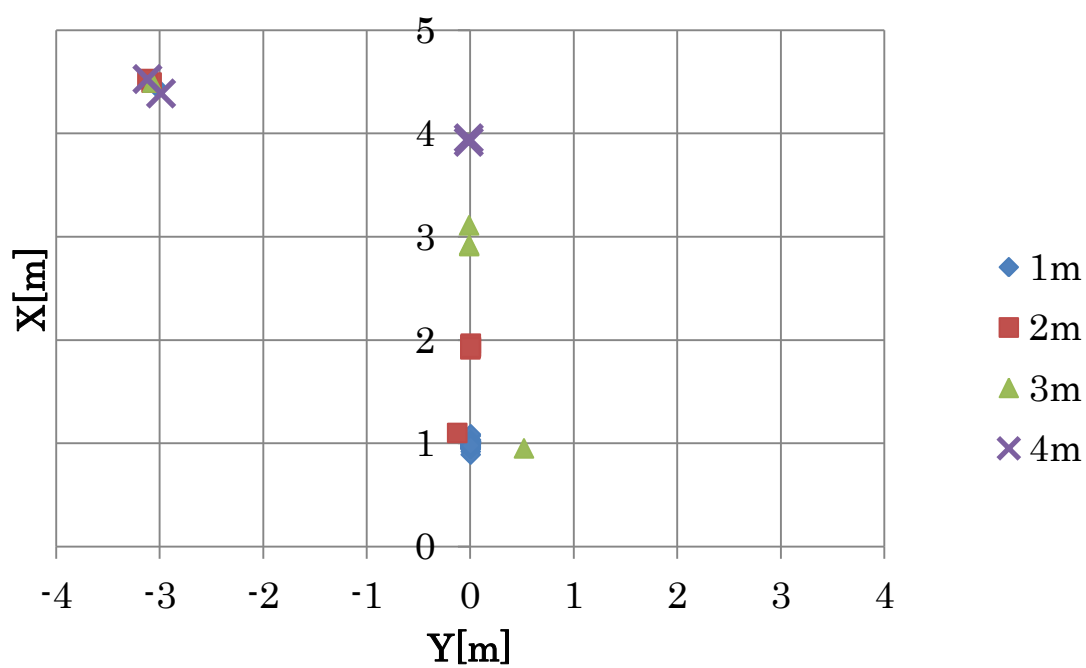


Figure 3.32 Fishing line 0.66mm

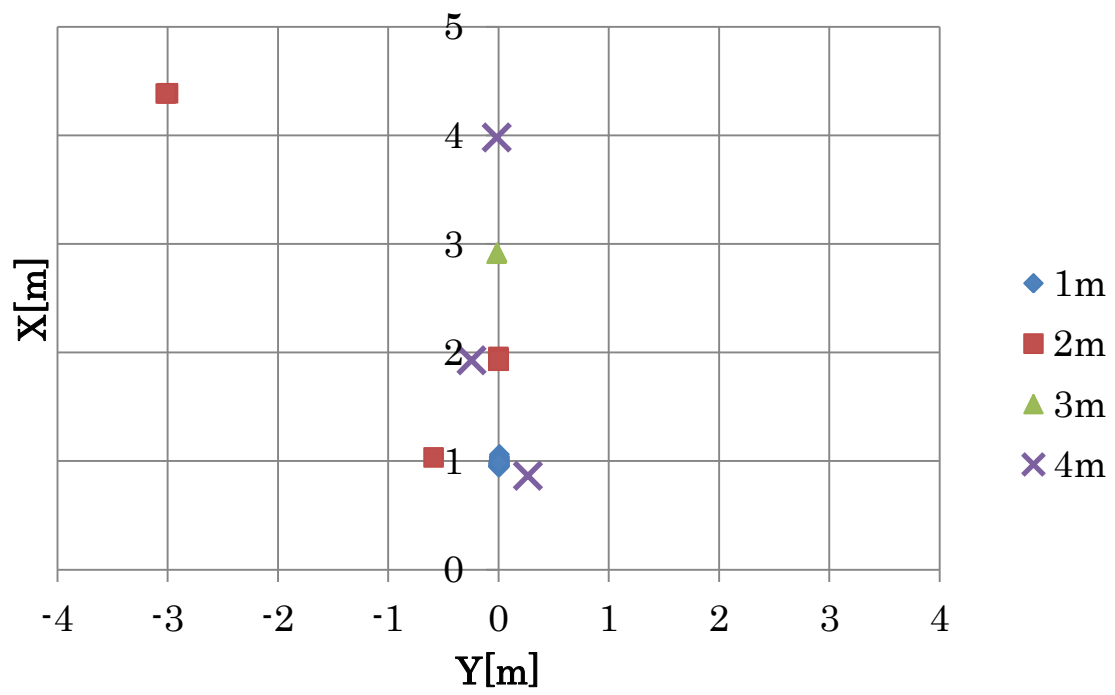


Figure 3.33 Fishing line 0.41mm

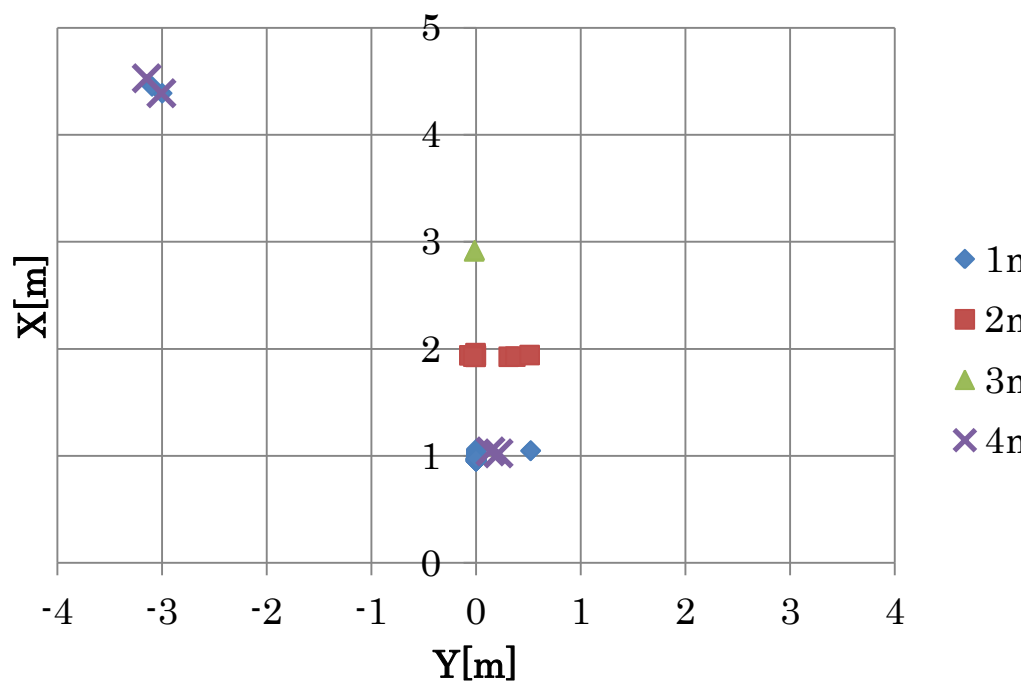


Figure 3.34 Fishing line 0.24mm

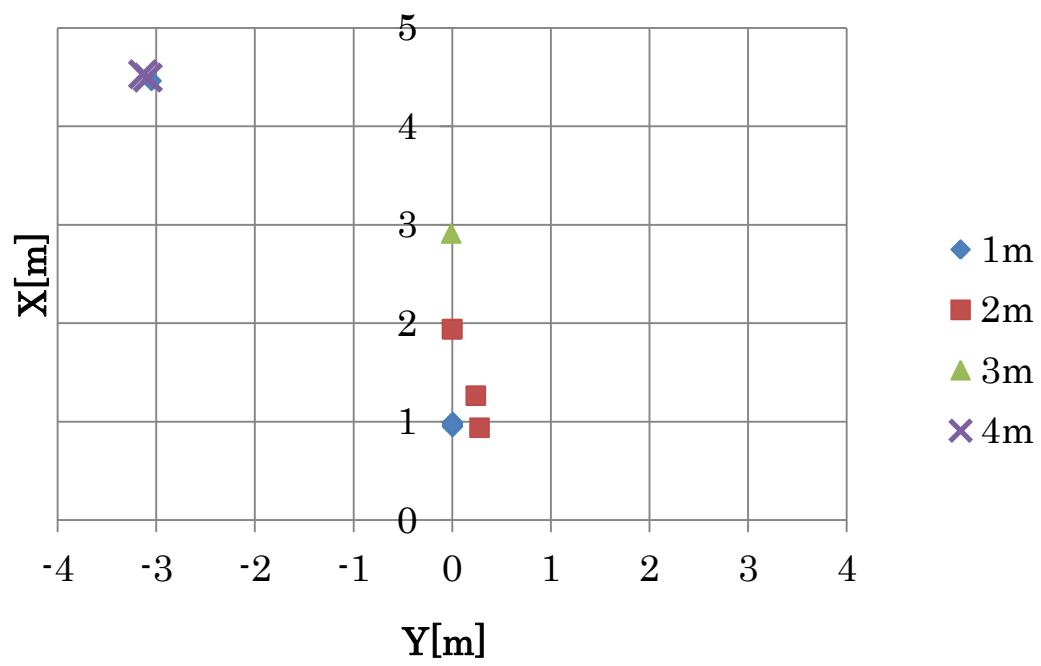


Figure 3.35 Fishing line 0.15mm

第4章 ソナーと光切断法を融合した探知手法

4.1 はじめに

本研究では、ソナーと光切断法を融合した探知手法として、Figure 4.1 に示す手法を提案する。第一に、ソナーによる探知を予測フェーズとして、ソナーの計測結果からグリッドマップを作製し障害物候補を求める。次に光切断法による探知を検出フェーズとして、予測フェーズで求めた障害物候補の距離と角度から画像処理の領域を限定し、障害物を検出する。

ソナーと光切断法の融合計測装置として、Figure 4.2 のような探知装置を作成した。上から、レーザーと回転台、ソナー、カメラの順で設置され、カメラ中心とレーザーの回転中心までの距離 $z=0.5\text{m}$ となる。第2章・第3章と同様に、水中ロボット試験水槽で釣糸の計測を行った。ソナーの位置は水深 2m 、カメラの位置は水深 2.25m となる。

4.2 予測フェーズ

4.2.1 音響画像の作成

ソナーは送信波を発し、反射波が戻ってくるまでの時間と反射波の強さを計測強度として計測している。ソナーのデータは、送信波の方向と分解能当たりの計測強度、距離で構成されている。本研究では $Range=5\text{m}$ とし、分解能を 2.4cm と設定しているため、一つの送信波から角度と 208 個の反射強度データが出力される。このようなデータからグリッドマップを作成し障害物候補を検出するため、ソナー中心から前方 5m 、左右 3.6m を 10cm 四方に分割することで、Figure 4.3 に示す 50×72 マスのグリッドマップを作製する。Figure 4.4 のように一つのグリッドに対して複数回反射強度が格納されるため、そのうちの最大値を格納する。また、ソナー送信波は進行方向に対し約 3 度の角度があるため、ソナー中心からの距離が離れるほど、Figure 4.5 のように反射強度データを格納するグリッド数が増加する。X-Y 平面上での音波角度を θ とすると、グリッド $[c][d]$ と音波中心線の距離 d_0 は(4.1)から求められる。また、送信波ごとに $3.6[\text{deg}]$ ずつ音響素子を動かしているため、送信波ごとの隙間を補正する目的で $\theta = 6[\text{deg}]$ とした。

$$d_0 = \frac{|c - d \times \tan(\theta)|}{\sqrt{1 + \tan^2(\theta)}} \quad (4.1)$$

グリッド[c][d]を通り音波中心線に垂直な直線と音波中心線の交点を(c₁,d₁)、ソーナーから点(c₁,d₁)までの距離を r とおく。このとき、 $d_0 < r \times \tan(3)$ のときにグリッド[c][d]に反射強度を格納する。

4.2.2 ラベリング

障害物候補グリッドが連続している時、同じ番号を割り振ることで、複数の障害物候補を一つのグループとして分類することができる。このような手法をラベリングという[9]。ラベリング処理には様々な方法があるが、本研究では 4 近傍ラベリング手法を用いた。

Figure 4.6 のようなグリッドマップでラベリングについて説明する。白色グリッドは反射強度が格納された障害物候補を示している。第一に Figure 4.7 のようにすべてのグリッドのラベル番号を 0 で初期化する。つぎにラベリング番号を割り振るために Table 4.1 のようなルックアップテーブルを作成する。そして画像の左上から障害物候補のグリッドを検索する。障害物候補グリッドが見つかったとき、Figure 4.8 のように左上、上、右上、左のグリッドを参照し、全て 0 の場合、最後に割り振った番号+1 を割り振る。参照したグリッドのラベル番号が複数存在した時は、最小の番号を割り振る。このとき、ルックアップテーブルで最小ではない B 列のラベル番号を、最少の番号に書き換える(Table 4.2)。

このような処理で Figure 4.9 のように障害物候補グリッドをラベリングすることができる。しかし、グリッドマップ上で連続していてもラベル番号が連続していない部分が存在しているので、ルックアップテーブルで修正する。ルックアップテーブルで B 列の値が A 列の値と異なっているときは、A 列のラベル番号を B 列の値に変更する。この処理で、Figure 4.10 のように連続した障害物候補グリッドを一つの障害物候補としてラベル番号で扱うことができる。

4.3 確認フェーズ

4.3.1 処理領域の限定

光切断法で画像処理を行う際、対象となる画像領域を障害物候補に限定する。各障害物候補がカメラ画像に占める領域をグリッドマップから求め、画像処理の範囲を決定する。Figure 4.11 のように障害物候補があるグリッドマップを例にとる。障害物候補に対して、X-Y 平面上で探知装置正面を 0[deg]として θ が最大になるグリッドと最小になるグリッドを求め、それぞれの角度を θ_1 、 θ_2 とする。このとき、カメラの焦点距離 f と θ_1 、 θ_2 から障害物候補がカメラ画像に表示される Y 軸方向の範囲は v_1, v_2 の値として (4.1)、(4.2) から求めることができる (Figure 4.12)。

$$v_1 = f \cdot \tan \theta_1 \quad (4.1)$$

$$v_2 = f \cdot \tan \theta_2 \quad (4.2)$$

次に障害物候補の X 軸方向の最大値 x_{max} 、最小値 x_{min} 、レーザー角度 α と (4.3)、(4.4) から ϕ_1 、 ϕ_2 を求める (Figure 4.13)。この値から障害物候補が表示される画像の Z 軸方向の範囲は w_1, w_2 の値として (4.5)、(4.6) から求めることができる (Figure 4.14)。

$$\tan \phi_1 = \frac{z_L}{x_{min}} - \frac{1}{\tan(180 - \alpha)} \quad (4.3)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{1}{\tan(180 - \alpha)} - \frac{z_L}{x_{max}} \quad (4.4)$$

$$w_1 = f \cdot \tan \phi_1 \quad (4.5)$$

$$w_2 = f \cdot \tan \phi_2 \quad (4.6)$$

v_1, v_2, w_1, w_2 からレーザー角度 α に対して画像処理する領域を限定する(Figure 4.15)。

4.4 融合手法の結果

第2章・第3章と同一条件で、融合手法により釣糸の計測を行った。太さ 2.6mm、距離 2m の計測結果を、グリッドマップ、ソナーデータ、光切断法、融合手法に分け、Figure 4.16～4.19 に示す。Figure 4.16 のグリッドマップでは、釣糸以外にも様々なノイズが計測されている。Figure 4.17 のソナーデータでは、閾値=70 の計測強度が出力された位置を示している。2m の位置に釣糸を計測しているが、送信波に幅があるため、横方向に広がった結果となっている。Figure 4.18 の光切断法の計測結果では、水槽壁面や水中の微粒子によるものと思われるノイズが計測されている。Figure 4.19 のソナーと光切断の融合による探知手法では、ノイズのない計測が行われている。ソナーデータ、光切断法、融合手法の X 軸方向の計測結果を Table 4.3 に示す。

次に統合手法による各釣糸の計測結果を Figure 4.20～4.28 に示す。太さ 2.6mm、距離 4m と太さ 2.0mm、距離 1m 以外の計測結果では、ノイズがない計測結果を得ることができた。ノイズが計測された原因として、ソナーのノイズと光切断法のノイズが同じ位置で計測されたためと考えられる。

太さ 2.6mm、距離 4m の計測結果で、画像処理のオフセットを 30 と 70 で比較したグラフを Figure 4.29 に示す。オフセットを増加させることで、ノイズを消去することが可能となる。次に、太さ 0.15mm、距離 2m の計測結果をオフセット 30 と 70 で比較したグラフを Figure 4.30 に示す。細い釣糸はレーザーの反射が弱いいため、オフセットを増加させるとこのように計測不可能になる。

4.5 考察

ソナーのデータから画像処理領域を絞り込むことで、ノイズを削減することが可能になった。融合手法でも計測されるノイズに対しては、オフセットを増加させることで除去することができるが、同時に太さ 0.15mm の釣糸が計測できなくなってしまう。そのため、オフセットの最適値を決定する手法が求められる。

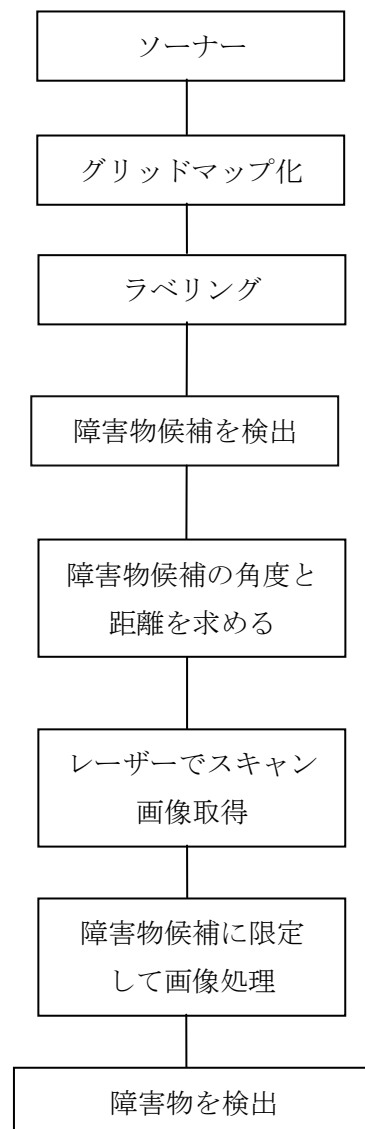


Figure 4.1 Flowchart of method

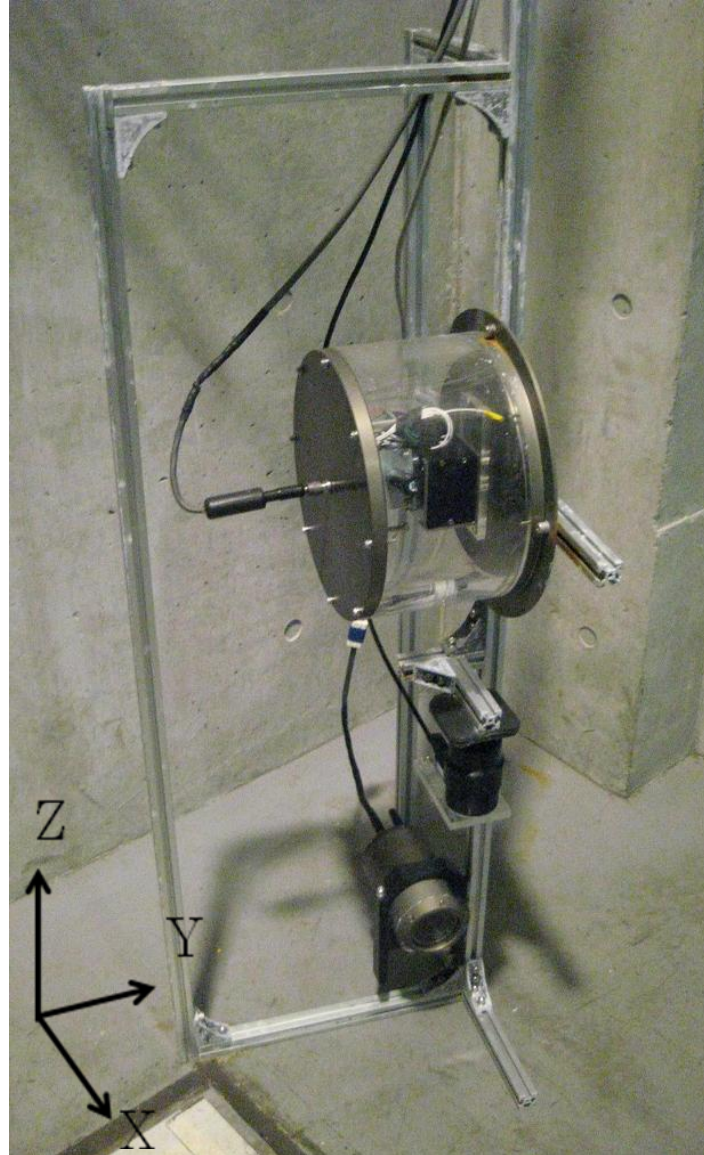


Figure 4.2 Device

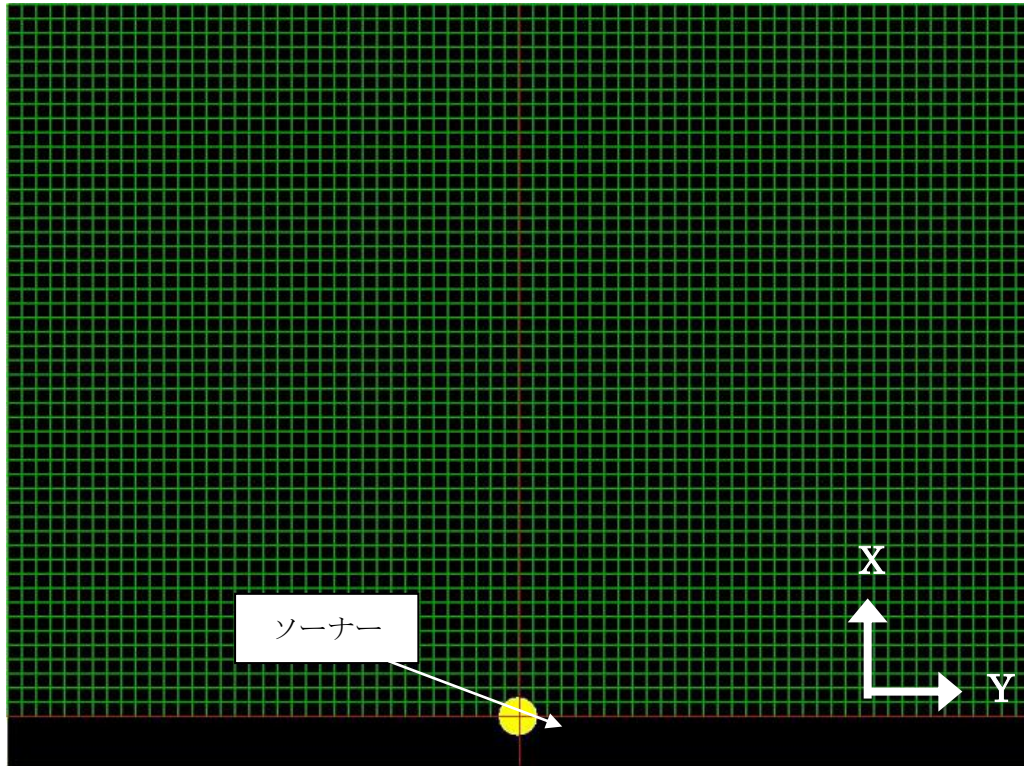


Figure 4.3 Grid map

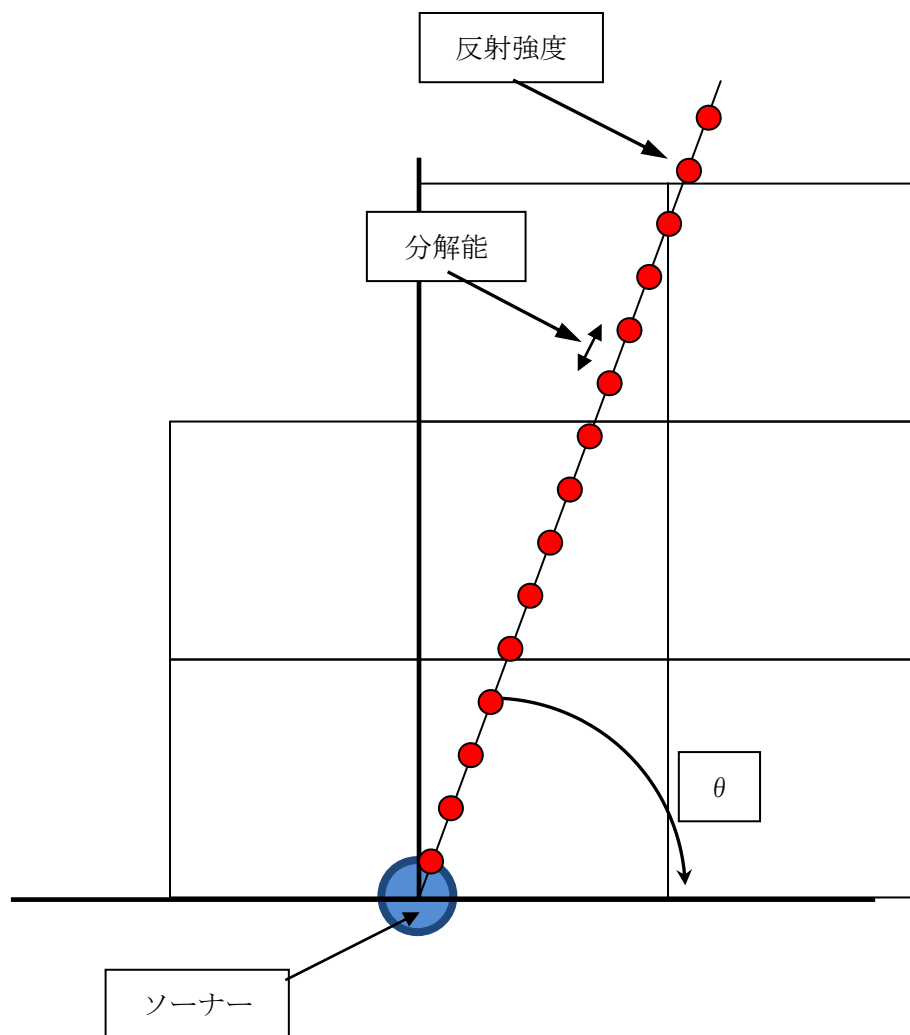


Figure 4.4 Sonar data form

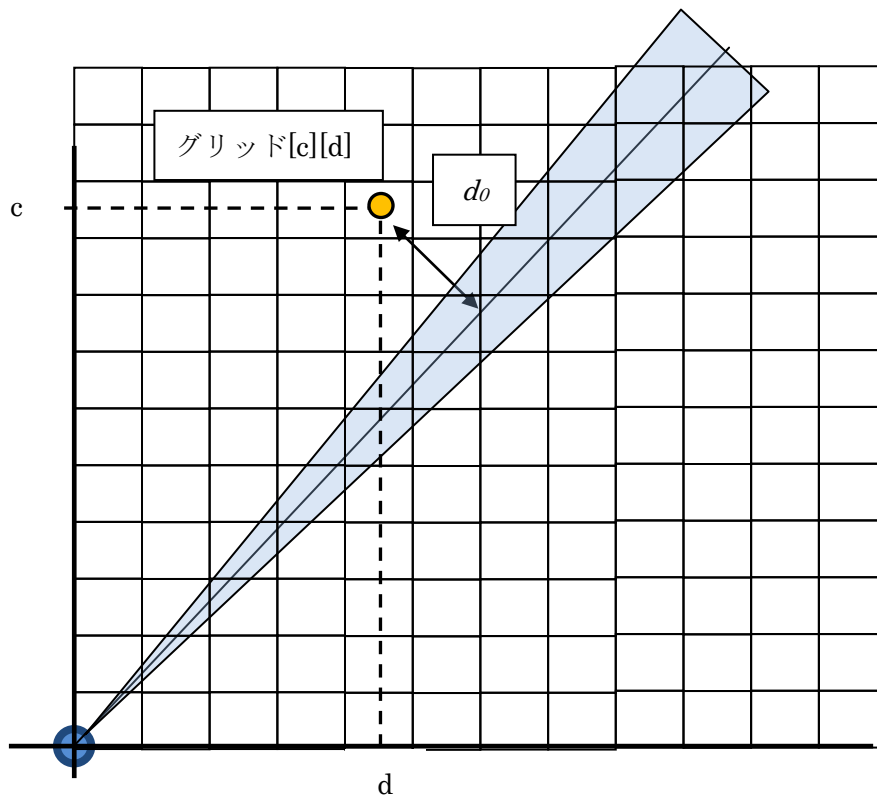


Figure 4.5 Sonar beam and grid map

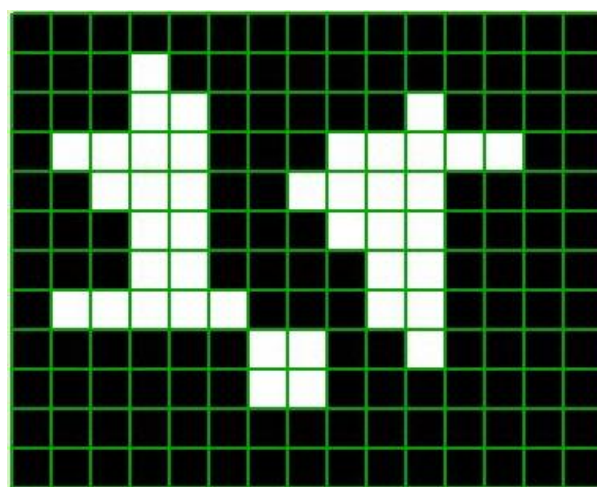


Figure 4.6 Grid map and no label

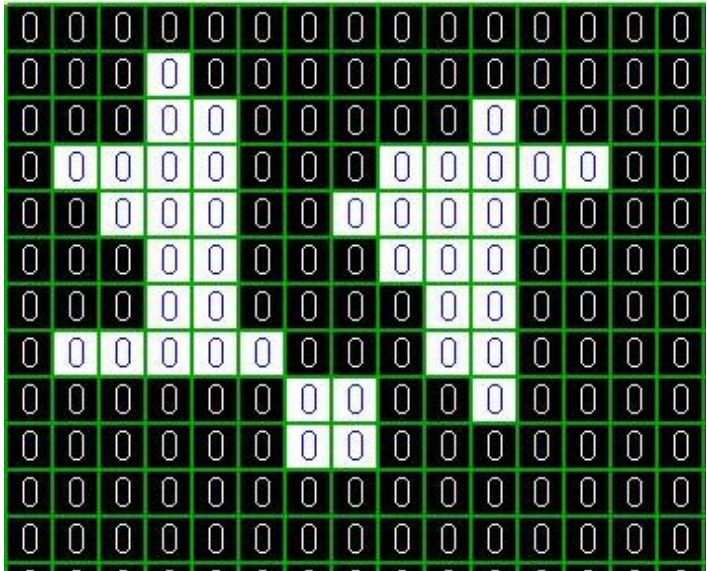


Figure 4.7 All zero label

Table 4.1 Lookup table 1

A	B
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10

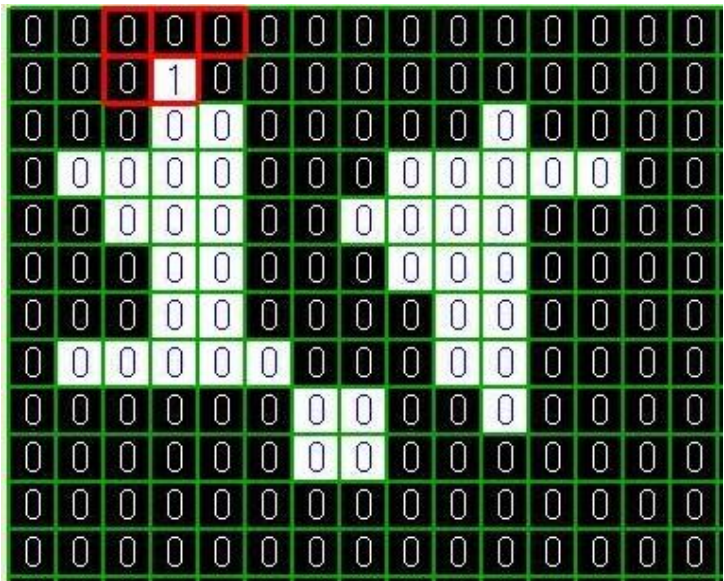


Figure 4.8 Label 1 start

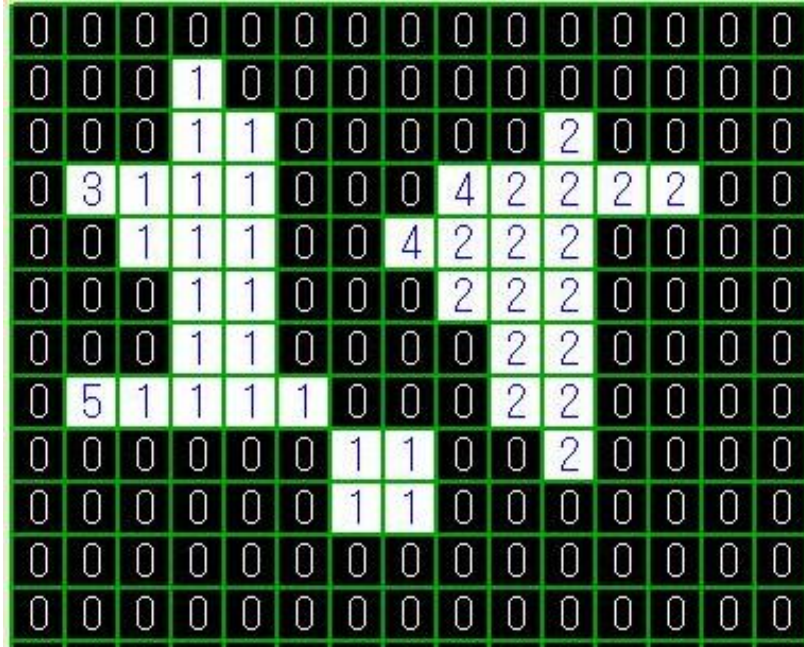


Figure 4.9 Mosaic label

Table 4.2 Lookup table 2

A	B
1	1
2	2
3	1
4	2
5	1
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10

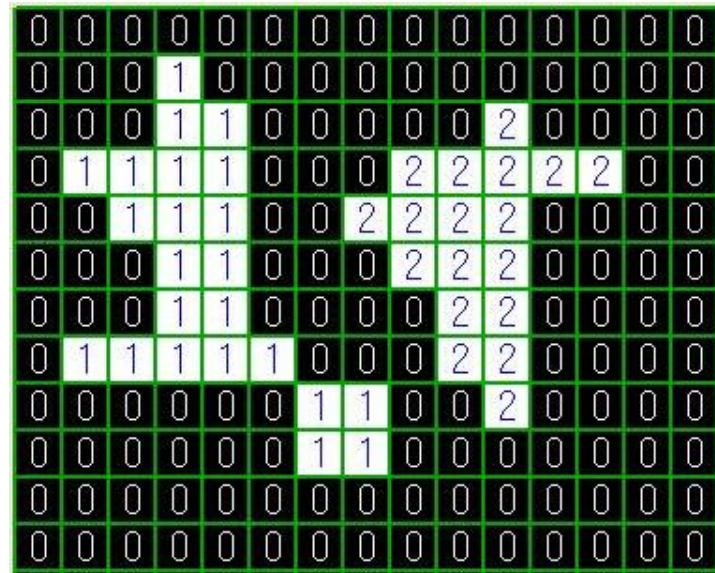


Figure 4.10 Labeled grid map

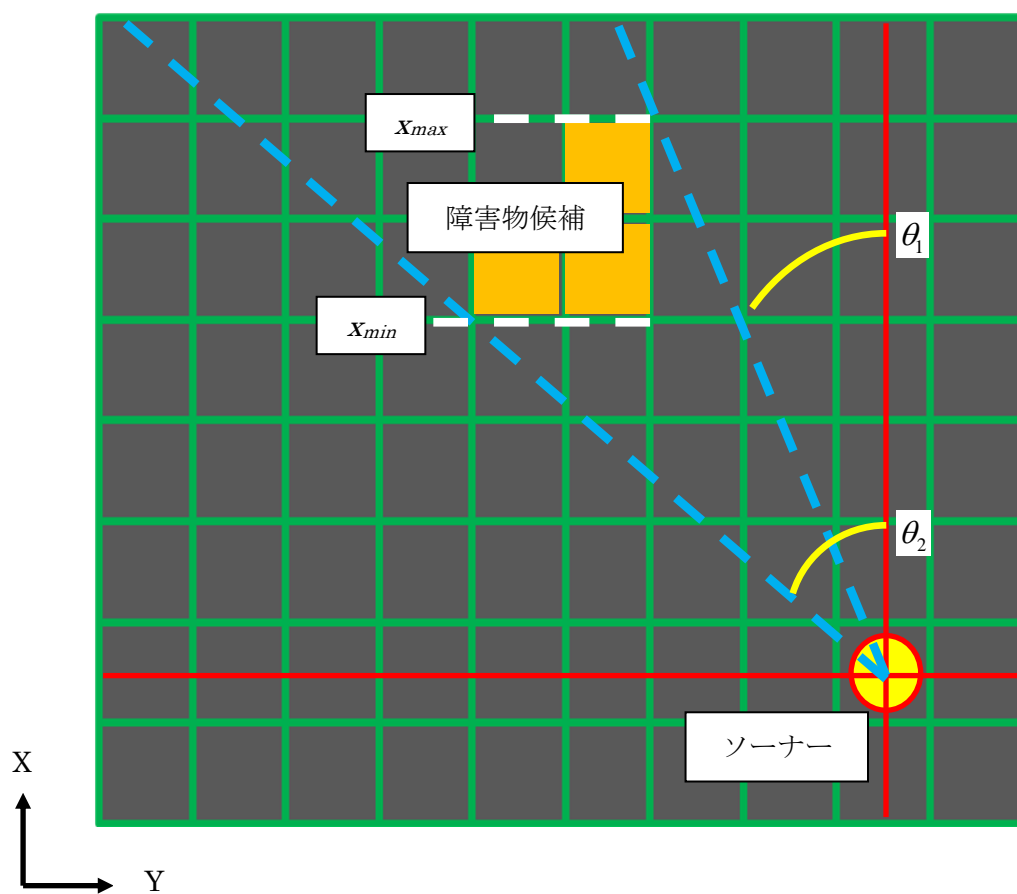


Figure 4.11 Grid map and

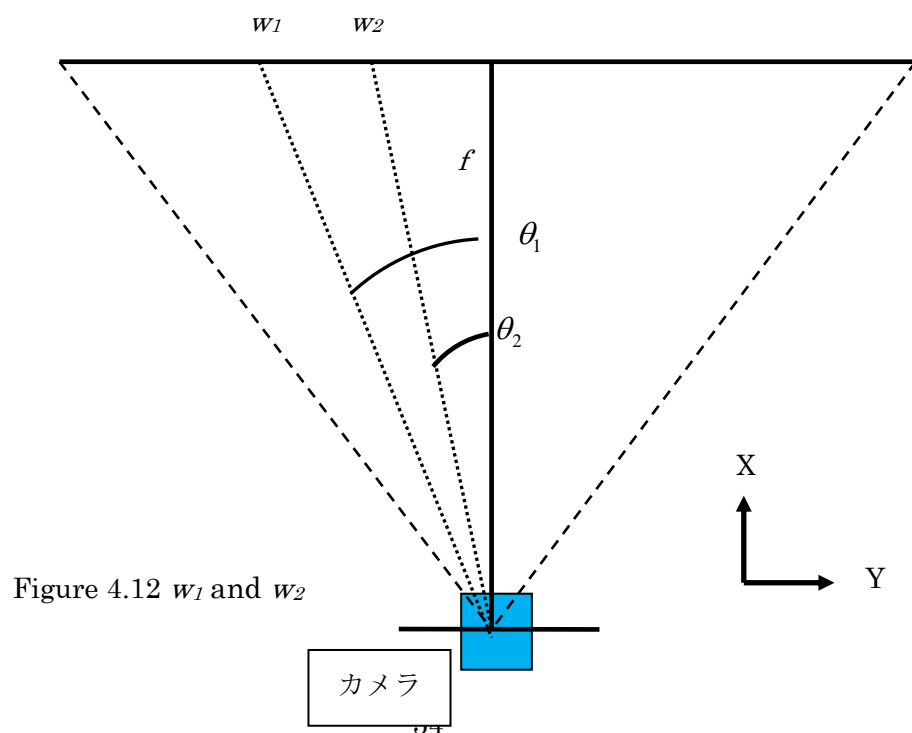


Figure 4.12 w_1 and w_2

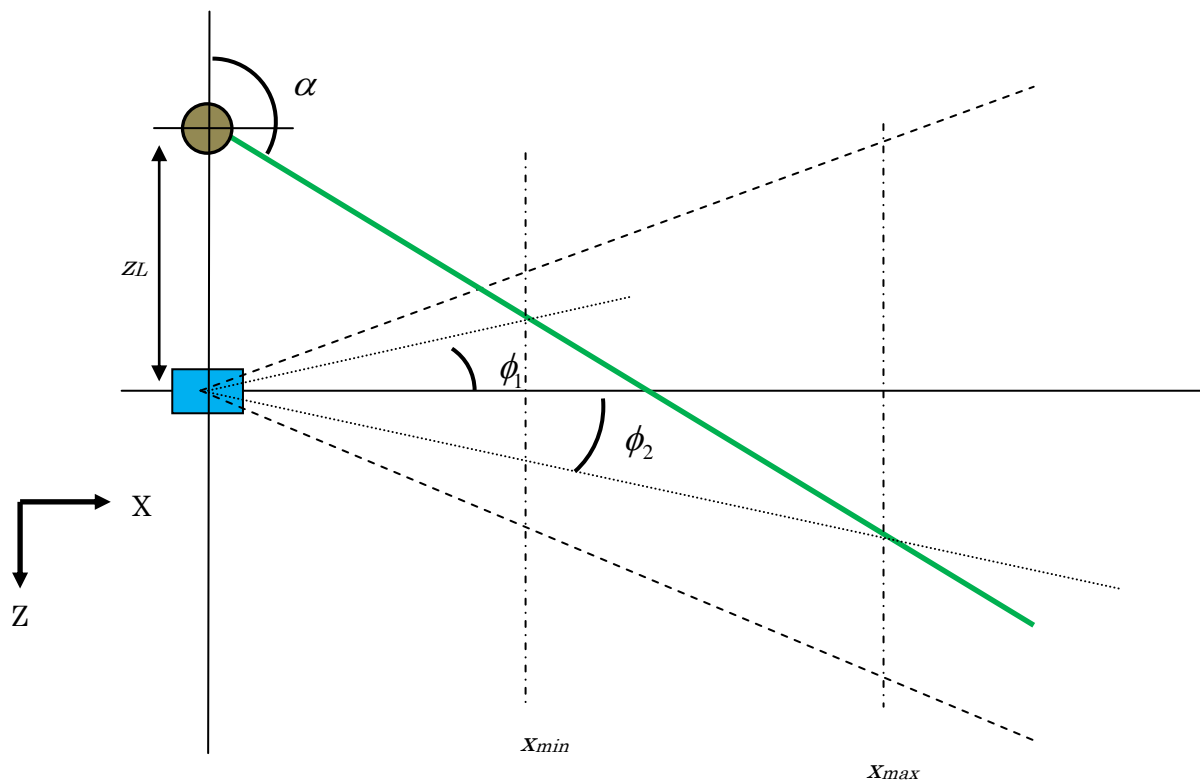


Figure 4.13 ϕ_1 and ϕ_2

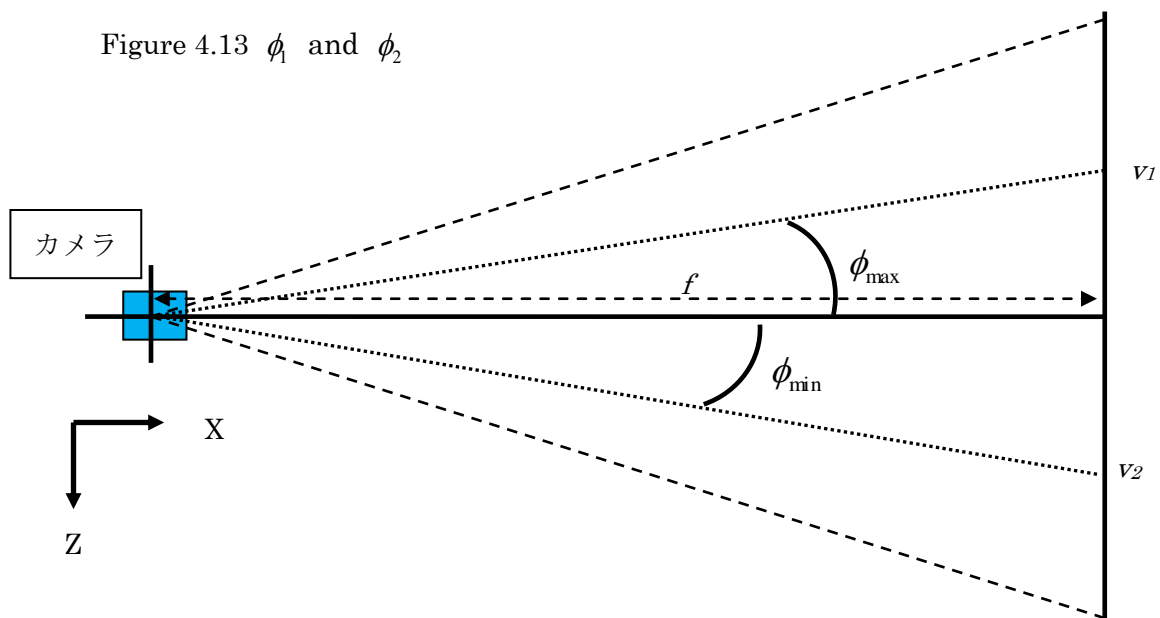


Figure 4.14 v_1 and v_2

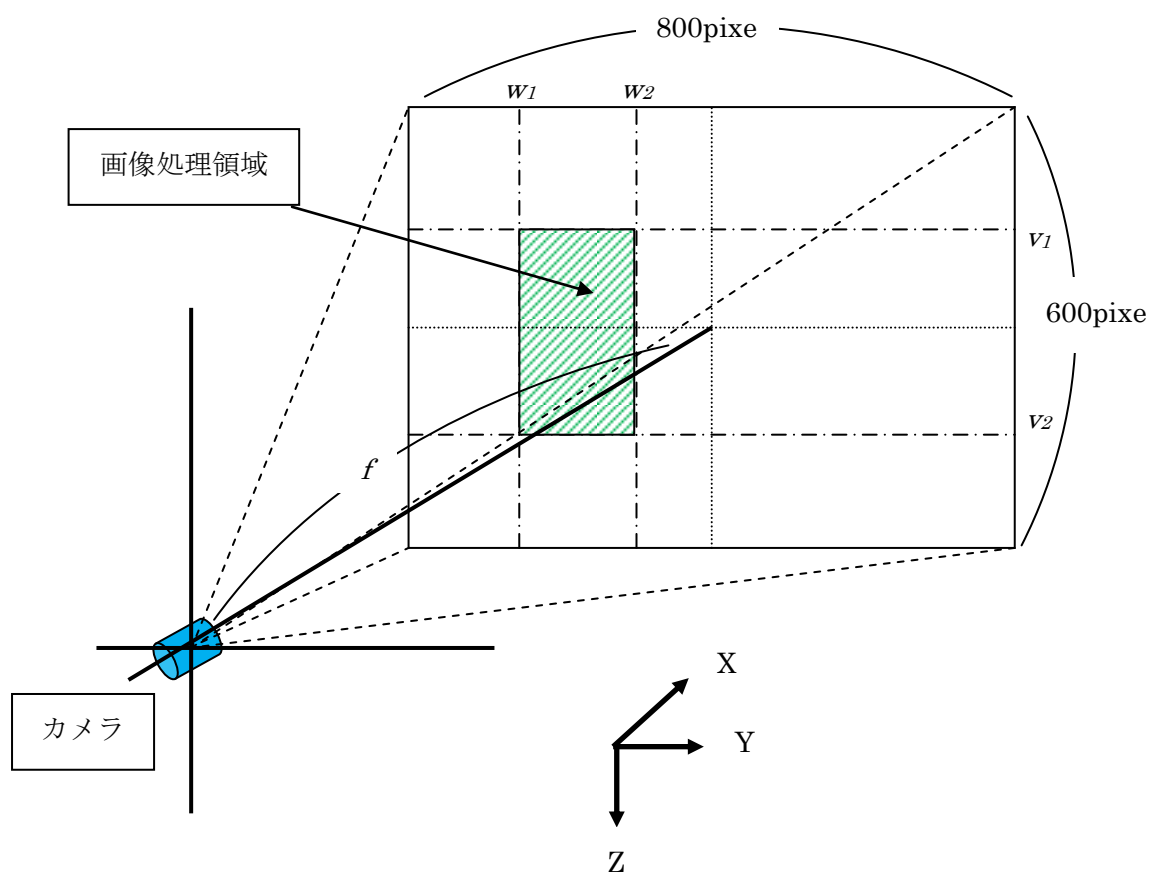


Figure 4.15 Limit of image processing

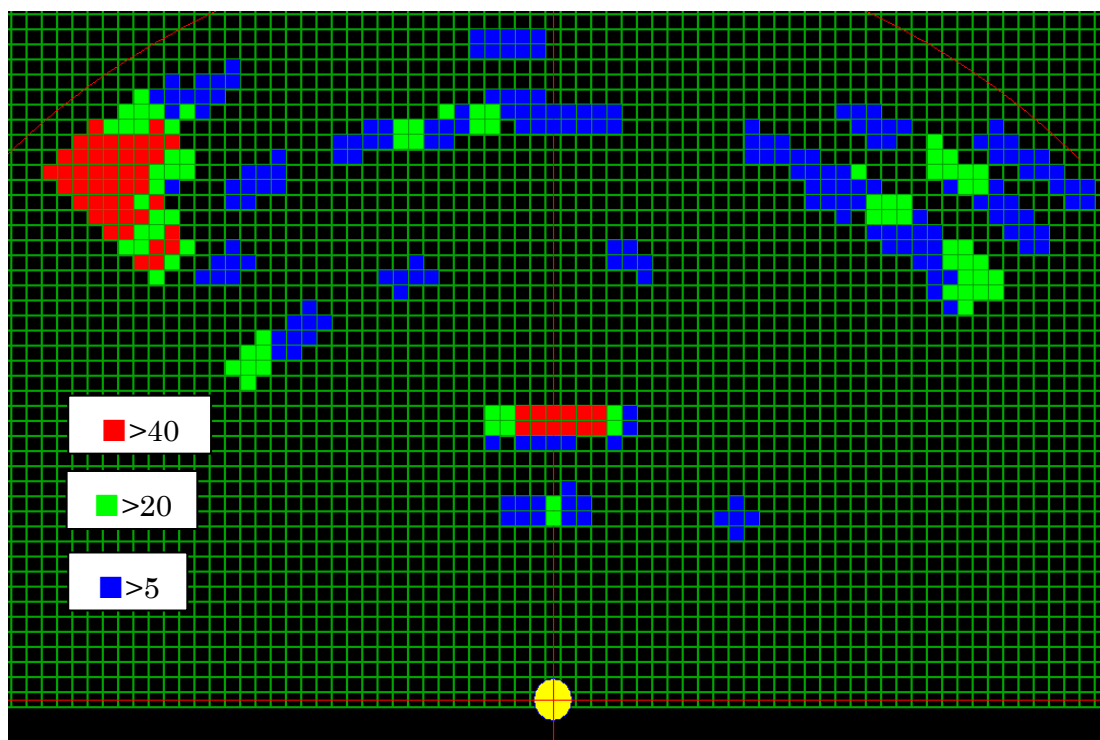


Figure 4.16 Grid map. Fishing line
2.6mm

range=2m

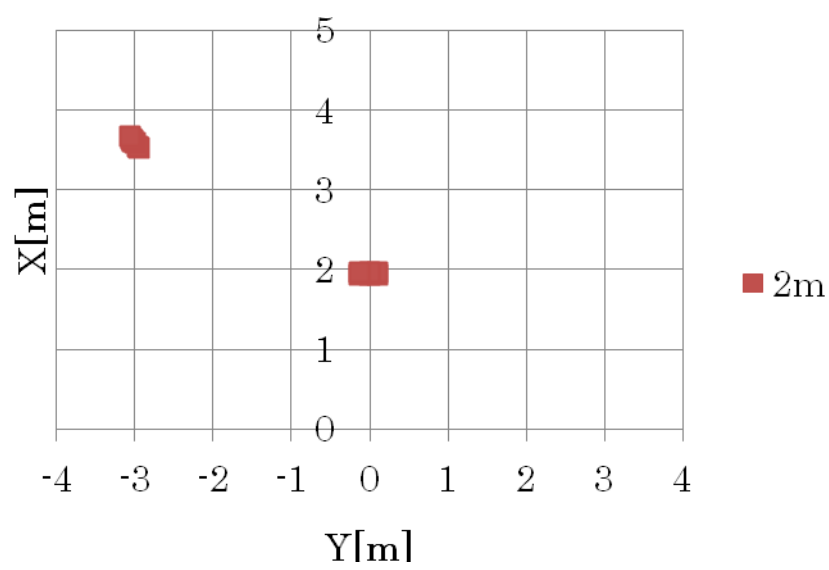


Figure 4.17 Sonar data
Threshold=70

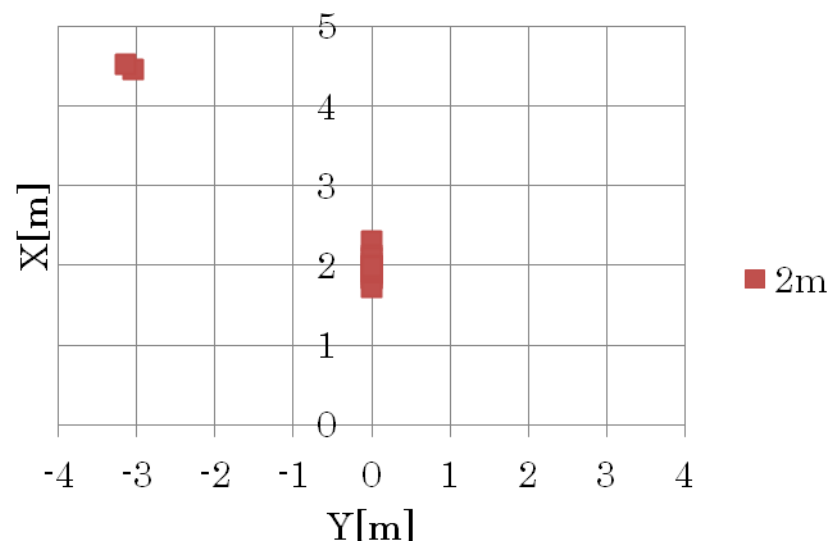


Figure 4.18 Light sectioning method

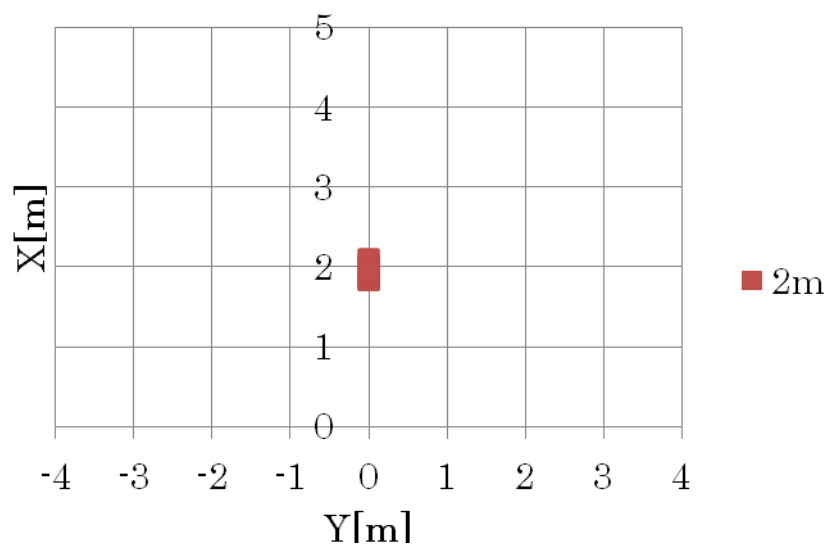


Figure 4.19 Fusion method of
sonar and light sectioning
method

Table 4.3 Measured results [m]

	最大値	最小値	平均値
ソナーデータ	3.67	1.94	2.84
光切断法	4.53	1.72	2.02
融合手法	2.09	1.83	1.94

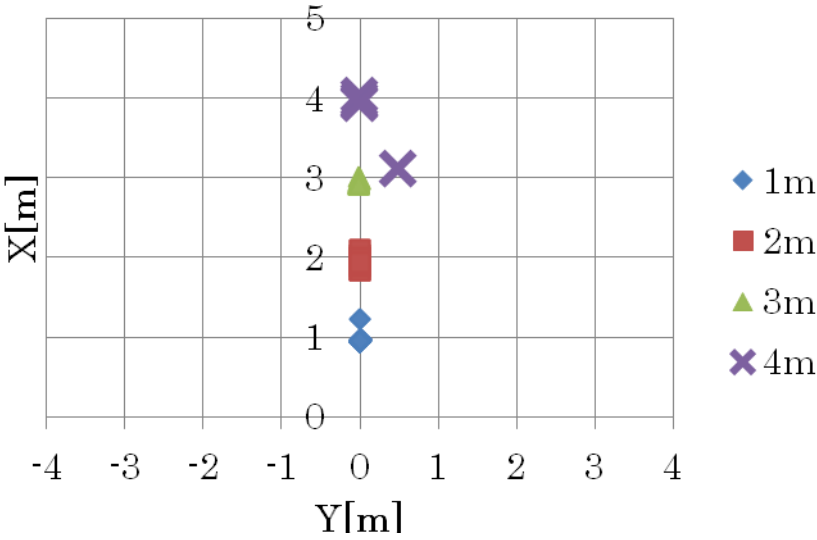


Figure 4.20 Fishing line 2.6mm

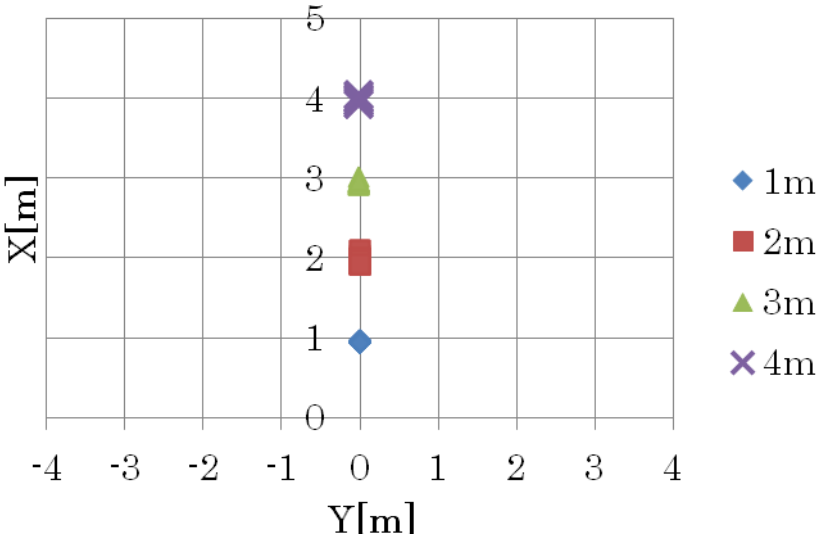


Figure 4.21 Fishing line 2.0mm

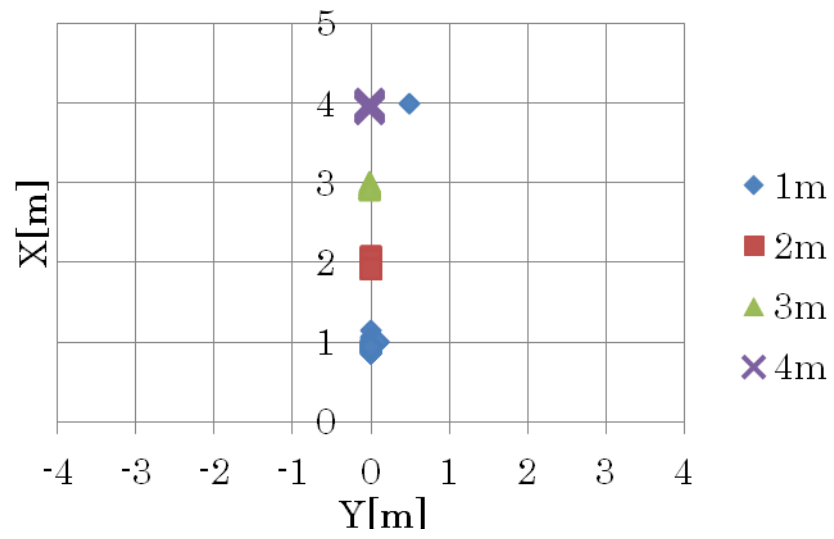


Figure 4.22 Fishing line 1.65mm

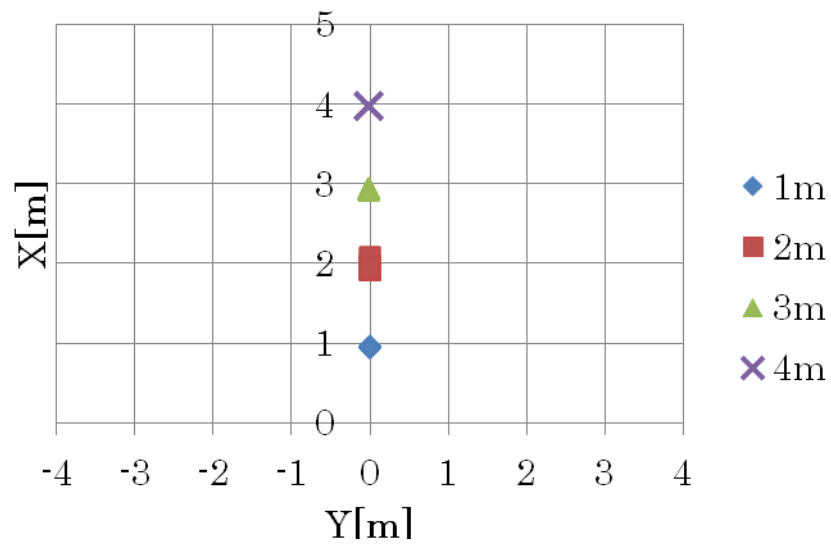


Figure 4.23 Fishing line 1.25mm

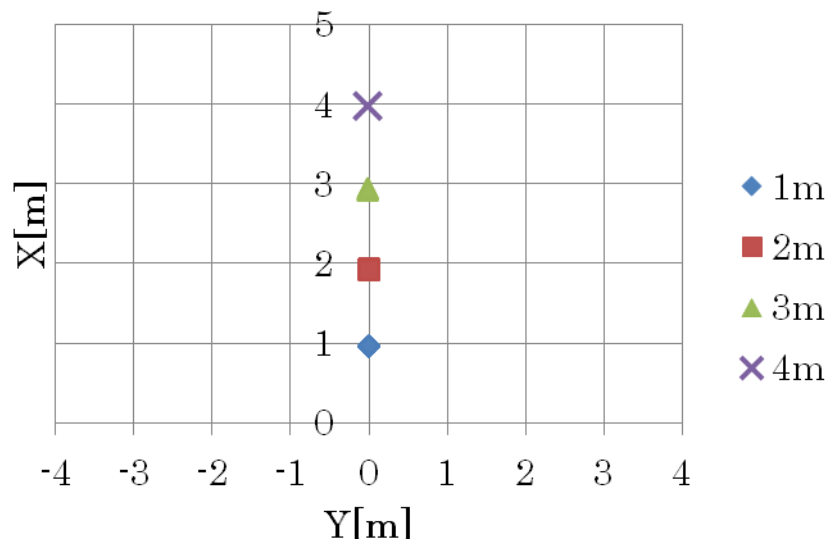


Figure 4.24 Fishing line 0.91mm

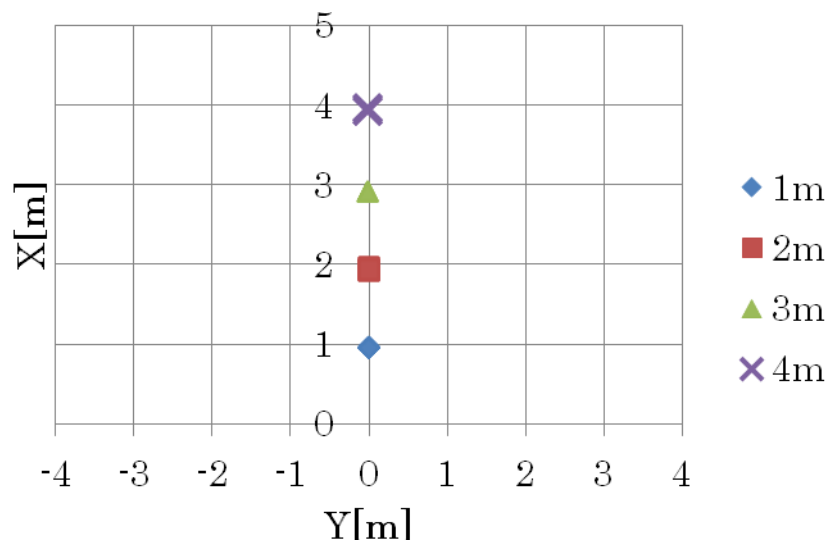


Figure 4.25 Fishing line 0.66mm

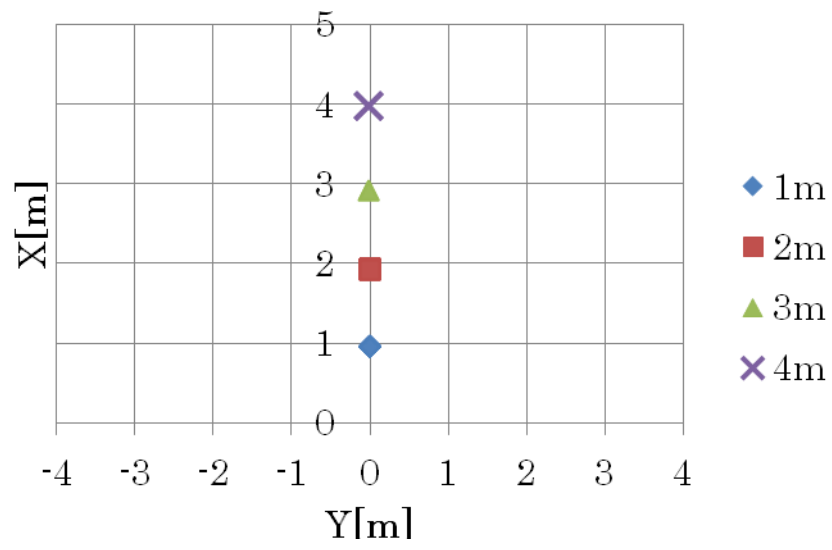


Figure 4.26 Fishing line 0.41mm

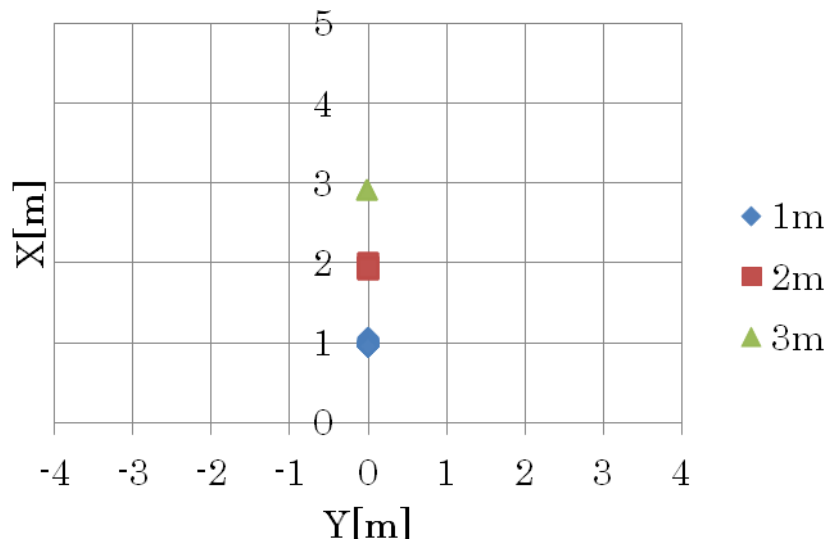


Figure 4.27 Fishing line 0.24mm

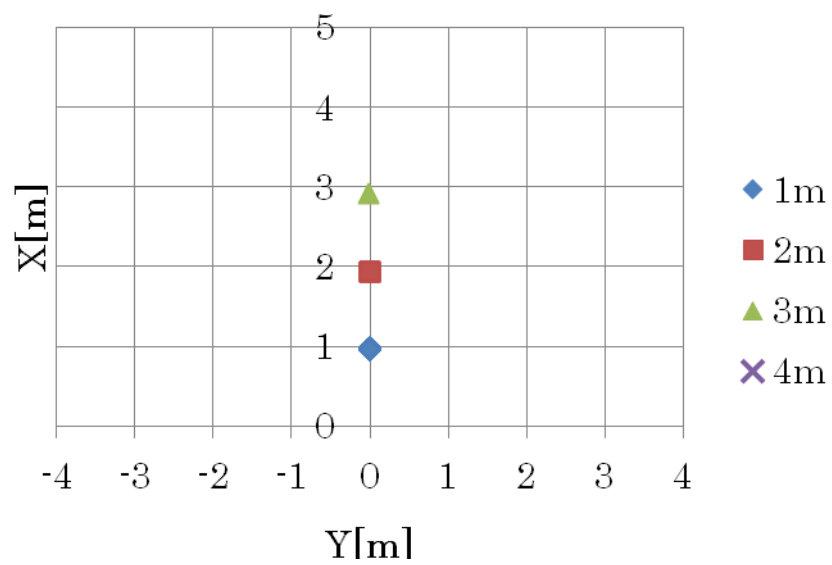


Figure 4.28 Fishing line 0.15mm

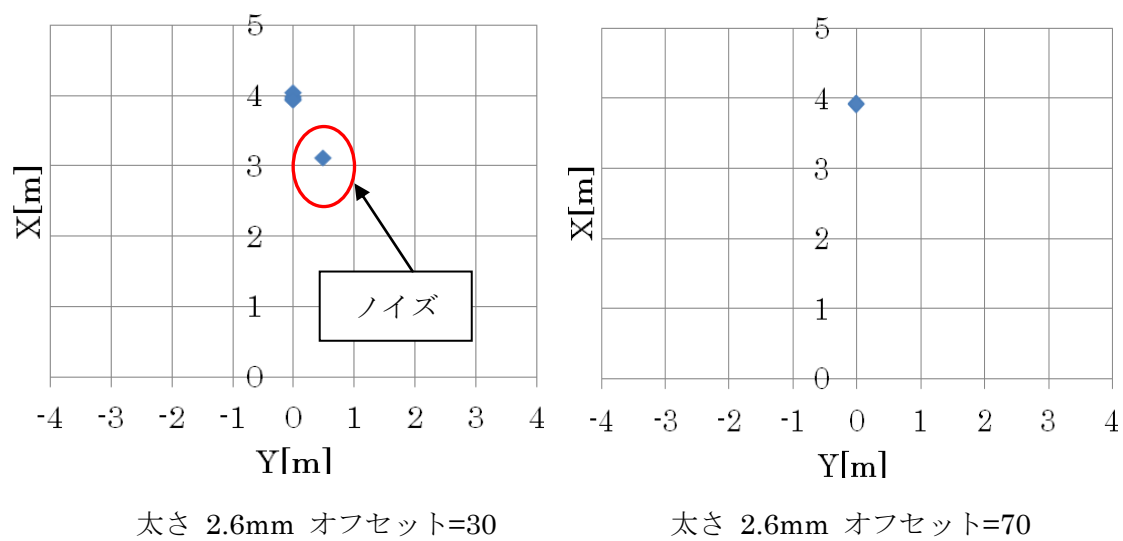


Figure 4.29 Comparison of
offset Fishing line 2.6mm 4m

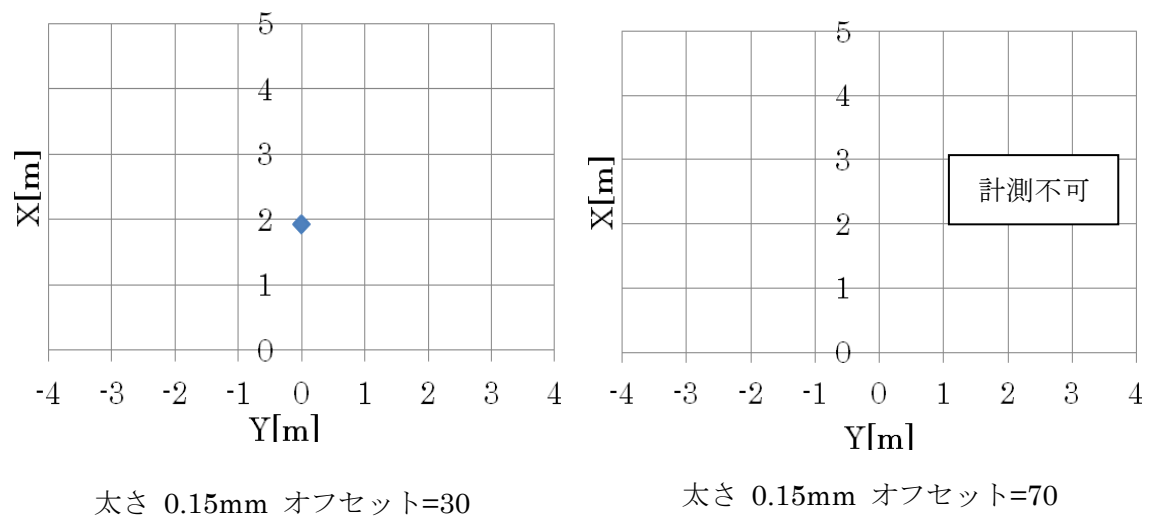


Figure 4.30 Comparison of offset
Fishing line 0.15mm 2m

第5章 結論

5.1 結論

本研究では、AUV に搭載することを前提として、ソーナールと光切断法を融合した探知システムを開発した。沿岸域で特に探知困難と思われる釣糸を対象として、ソーナール・光切断法単独での計測結果より有効な結果を得ることを目標とした。

ソーナールによる釣糸の計測実験で、1m~4m で距離を変化させ、太さ 0.15mm~2.6mm の9種類のナイロン製釣糸の反射波の強さを計測した。すべての糸から反射波を計測でき、計測強度は14~159 となった。しかし、サイドローブやマルチパスによるものと思われる計測強度 30~40 のノイズが多数計測された。太さ 0.15mm の釣糸は計測強度が弱く、距離が離れるとノイズとの区別が困難であることも判明した。

次にソーナールと同一条件で光切断法による釣糸の計測実験を行った。結果として、1m~3m まで、すべての釣糸からレーザーの反射を計測し、太さ 0.15mm 以外の釣糸では距離 4m でも計測できた。しかし、水中の微粒子や水槽壁面のボルトによるものと思われるノイズが計測され、釣糸とノイズを分離することは困難であった。

ソーナールと光切断法による計測実験の結果を踏まえ、ソーナール・光切断法の融合手法を開発し同条件で釣糸の計測実験を行った。ソーナールのデータから光切断法における画像処理領域を限定することで、ノイズを削減することができた。

融合手法による探知でも太さ 2.6mm 距離 4m と 2.0mm, 距離 1m ではノイズは計測される。このノイズは、画像処理のオフセットを 30 から 70 へと増加させることで除去することが可能になる。しかし、太さ 0.15mm の釣糸はレーザーの反射が弱いいため、オフセット=70 とすると距離 2m 以降で計測が不可能になってしまう。

5.2 今後の課題

今後の課題として、計測強度を画像処理のオフセットに利用することが考えられる。本研究では、ソーナーと光切断法の融合手法によってノイズを削減することが可能となったが、それでも除去できないノイズが計測された。このノイズに対しては、画像処理のオフセットを増加させることで除去可能であることが分かった。しかし、オフセットを増加させると、太さ 0.15mm の釣糸を 2m 以降、計測することが不可能になってしまう。そこで、ソーナーによる計測強度からオフセットの最適値を求める手法が考えられる。第 2 章から釣糸の太さによって計測強度が変化することが判明しているため、計測強度が高いときはオフセットを上げ、反対に計測強度が低いときは、オフセットを下げる。このような手法によりよりノイズを削減し、細い糸を検出することが可能になると思われる。このためには、距離と計測強度から釣糸の太さを求めオフセットを決定するモデルが必要となる。しかし、Figure 5.1 に示すように、太さ 0.15mm～0.66mm では計測強度と釣糸の太さに相関関係があるが、0.91mm からはそのような関係が見られない。このため、計測強度から釣糸の太さを計算するモデルの作成が困難となる。

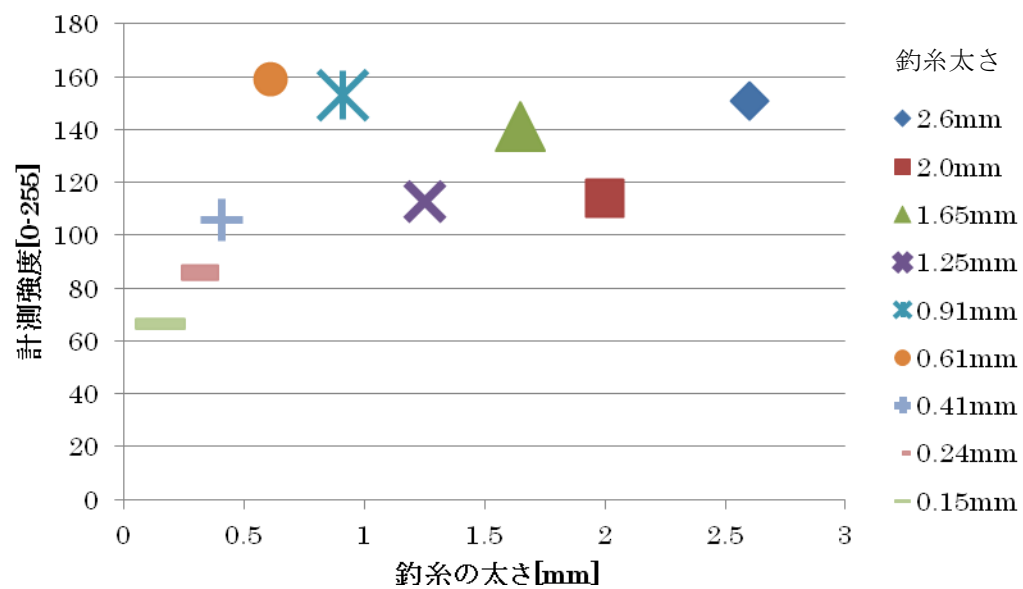


Figure 5.1 Fishing line received levels at 1m

参考文献

- [1] 浦環, 高川真一. 海中ロボット. 成山堂書店, apr1997
- [2] 海の再生支援プロジェクト～水中ロボットによる被災地の海の再生力探査事業
(<http://www.oa.u-tokyo.ac.jp/shinsai2011/uminosaisei.html>)
- [3] <http://www-pord.ucsd.edu/~jen/sio210/>
- [4] 海洋音響学会(編). 海洋音響の基礎と応用. 成山堂出版. apr2004
- [5] Trittech 社ホームページ. <http://www.tritech.co.uk/>
- [6] 李枢浩: 海底熱水チムニーの三次元形状モデルの作成に関する研究, 東京大学修士論文 (2010 年)
- [7] OpenCV ホームページ. <http://opencv.jp/>
- [8] Global-laser ホームページ. <http://www.global-lasertech.co.uk/>
- [9] 山口智光, 及川一美, 大久保重範+*et. al.*, : 視覚センサを用いた自律移動ロボットの行動決定, 計測自動制御学会東北支部 第 231 回研究集会 (2006. 10. 31) 資料番号 241-4

謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所浦研究室の皆さんからのご協力のおかげで完成させることができました。浦研究室という恵まれた環境のなかで、2年間の研究を行えたことを非常に幸運であると感じています。

浦環教授からは、研究に関するアドバイスだけでなく、研究者としての模範となる生き方を教わりました。浅田昭教授には副指導教官として、丁寧なご指導を頂き感謝しています。巻俊宏准教授からは、研究の方針や様々な知識を優しく教えていただきました。また、南三陸町での復興調査の際は、水中ロボットを通じた社会貢献とはどういうものかを間近で見学させていただきました。Blair Thornton 准教授からは、すぐれたご指摘をいただきました。西田祐也研究員からは論文の執筆に関して多大なご支援を頂きました。自分のつたない論文を丁寧に添削頂き、真に感謝しています。このようなご支援のおかげで修士論文をより完成度の高いものにすることができました。佐藤芳紀研究員には、ソフトウェアについて丁寧に指導して頂きました。おかげでプログラミング技術を向上させることができました。博士課程の松田匠未氏には、AUV「YebisURA」の改良や水中ロボコンについて指導していただきました。坂巻隆技術専門職員には、実験の際に大変お世話になりました。細かいことからいろいろと準備していただき、おかげで実験を滞りなく進めることができました。Micron のビームパターンの掲載を許可していただいた Tritech International Limited 社にはこの場を借りてお礼を申し上げたいと思います。杉松治美研究員、Adrian Bodenmann 研究員、SangekarMehulNaresh 氏、Unnikrishna.P.V氏、能勢義昭氏と浦研究室の皆様には、いつも親切にご指導いただき、大変感謝しています。たくさんの方々から助けていただき、非常に心強く感じました。

最後に、予定より長い学生生活を支えてくれた両親、祖父母に心から感謝いたします。