

水中調査自動化のための画像処理技術に関する研究

著者	安 鍾賢
学位授与年度	平成28年度
学位授与番号	17104甲生工第287号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00006336

水中調査自動化のための
画像処理技術に関する研究

指導教官 石井 和男
安 鍾賢

目次

図の目次	iii
表目次.....	vii
変数一覧	viii
1.序論	2
1.1 はじめに	2
1.2 水中ロボット	3
1.2.1 有人深海探査艇 (HOV)	3
1.2.2 遠隔操作型の無人潜水機 (ROV)	4
1.2.3 自律型無人潜水機 (AUV)	5
1.3 水中ロボットによる海底調査.....	6
1.3.1 AUV を用いた海底観測調査.....	7
1.3.2 ROV を用いたサンプリング調査.....	8
1.4 研究目的	9
2.水中画像補正技術	14
2.1 水中ロボットに撮影された深海画像の特性	14
2.2.水中画像補正のための関連研究	21
2.2.1 Retinex 理論	24
2.2.2 Singh の画像補正.....	25
2.3 画像スケーリング手法.....	26
2.4 水中画像補正の有効性評価.....	29
2.4.1 評価実験	29
2.4.2 画像処理パラメータの算出.....	33
2.4.3 深海画像への適用と評価	36
2.5 考察	40
3.興味画像の選択.....	42
3.1 対象認識による画像選択.....	43
3.1.1 対象認識.....	43
3.1.2 提案する対象認識アルゴリズム	45

3.2 注意モデルによる画像選択.....	52
3.2.1 Itti-Koch モデル.....	52
3.2.2 海底画像への適用.....	54
3.3 考察.....	55
4.水中画像の圧縮と復元.....	57
4.1 画像圧縮と復元方法.....	60
4.2 圧縮画像の類似性評価.....	65
4.3 AUV を用いた画像圧縮と送信実験.....	69
4.4 考察.....	74
5.実海域での画像送信実験.....	76
5.1 静岡駿河湾での実験.....	76
5.2 オホーツク海調査.....	81
5.3 沖縄瀬底島サンゴ生息地調査.....	84
5.4 考察.....	88
6.結論.....	90
参考文献.....	94
謝辞.....	98

図の目次

Fig.1. 1 The Classification of underwater robot	3
Fig.1. 2 HOV: Shinkai 6500 (JAMSTEC) (http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/shinkai6500.html)	4
Fig.1. 3 ROV: Hyper dolphin (JAMSTEC) (http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/hyperdolphin.html)	5
Fig.1. 4 AUV: TUNA-SAND, AUV: TUNA-SAND2 (IIS).....	6
Fig.1. 5 The conventional deep sea floor observation using AUV and the sea floor images map (a): The overview of deep sea floor observation using AUV, (b): The composed sea floor image map [11].....	7
Fig.1. 6 The overview of sampling by ROV.....	8
Fig.1. 7 Overview of proposing the ocean exploration system using an AUV.....	11
Fig.2. 1 The light about red, green and blue attenuation in underwater environment.....	15
Fig.2. 2 The overview of deep seafloor observation using AUV.....	16
Fig.2. 3 The Deep seafloor images taken by AUV (a): Deep seafloor image which taken 0.5m (b): Deep seafloor image which taken 1.9m (c): Deep seafloor image which taken 2.2m (d): Deep seafloor image which taken 2.5m	17
Fig.2. 4 Hue and saturation graphs about images in Fig.2. 3 (a): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (a) (b): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (b) (c): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (c) (d): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (d).....	18
Fig.2. 5 Brightness histograms about images in Fig.2. 3 (a): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (a) (b): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (b) (c): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (c) (d): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (d).....	19
Fig.2. 6 The property of deep sea images about non-uniformed illumination in	

RGB space and luminance. (a): The change of RGB values about non-uniformed illumination in (c) of Fig.2.3 (b): The change of RGB values about non-uniformed illumination in (d) of Fig.2.3	20
Fig.2. 7 The three components of underwater optical imaging	22
Fig.2. 8 Overview of illumination and reflectance in imaging	23
Fig.2. 9 A proposed image enhancement method	27
Fig.2. 10 The concept of Hue adjustment	27
Fig.2.11 A pool environment and experimental setup of color enhancement (a): An experimental setup, (b): A pool environment	30
Fig.2. 12 The resultant images by Singh' method and Retinex theory.....	31
Fig.2. 13 The detail of illuminations by each method	32
Fig.2. 14 A proposed image enhancement process.....	33
Fig.2. 15 The variations of hue value about altitude on each color by proposed method.....	34
Fig.2. 16 The variations of average of saturation and brightness values by proposed enhancement method	35
Fig.2. 17 The enhanced images by proposed method corresponding to the image in Fig.2. 3.....	36
Fig.2. 18 The resultant images by each process in Fig.2. 14	37
Fig.2. 19 The change of HSB values by the proposed enhancement method	37
Fig.2. 20 The change of hue and saturation area	38
Fig.3. 1 The processed results using SIFT descriptor (a): Gray image which is taken 1.9m, (b): Gray image which is taken 2.2m, (c): Gray image which is taken 2.5m, (d): Enhanced gray image which is taken 1.9m, (e): Enhanced gray image which is taken 2.2m, (f): Enhanced gray image which is taken 2.5m	44
Fig.3. 2 The flow chart of image segmentation process	46
Fig.3. 3 The results by each process of image segmentation (a): Binarization, (b): Closing, (c): Labeling and (d): Checking region size .	47
Fig.3. 4 The flow chart of classification based on BoK.....	48
Fig.3. 5 Making dictionary and comparison in BoK.....	49
Fig.3. 6 The result images by recognition process	49
Fig.3. 7 The result images by marine life recognition	50
Fig.3. 8 The detail of calculation of Saliency map.....	53

Fig.3. 9 Examples of image selection by Itti-Koch model	54
Fig.4. 1 The overview of experiment and resultant image in Hoag's paper [41]	58
Fig.4. 2 The acoustic communication during exploration	59
Fig.4. 3 The change of color bit (24bit -> 4bit).....	60
Fig.4. 4 Change of color depth from an image (a): 24-bit color, (b): 4-bit color, (c): 3-bit color, (d): 2-bit color	60
Fig.4. 5 The concept of proposed image compression and reconstruction method (2bit compression)	61
Fig.4. 6 The used median-cut algorithm.....	63
Fig.4. 7 The processed results of Median-cut algorithm.....	64
Fig.4. 8 A color palette from 10 enhanced deep sea floor images and a sample image by compression method (4bit)	66
Fig.4. 9 A comparison between Enhanced images and compressed images	67
Fig.4. 10 The Comparison between Saliency map by enhanced image and Saliency map by compressed image	68
Fig.4. 11 A pool environment for experiment of acoustic transmission using AUV.....	70
Fig.4. 12 Payloads and sensors arrangement [48]	70
Fig.4. 13 The transmitter and receiver for image transmission.....	71
Fig.4. 14 The experimental setup for image transmission	72
Fig.4. 15 The experimental results (a): The crab model image by AUV, (b), (c): The area images of crab model in reconstructed image by proposed method, (d), (e): The reconstructed images by proposed method	73
Fig.5. 1 The experiment point	76
Fig.5. 2 The support ship Tauchi-maru (http://www.seatec.jp/setsubi/shiensen.html)	77
Fig.5. 3 The scene of salvage barge and AUV	78
Fig.5. 4 The overview of acoustic transmission experiment	79
Fig.5. 5 The results of transmission experiment.....	80
Fig.5. 6 The observation point in the sea of Okhotsk	81
Fig.5. 7 The research vessel: Hokko-maru	82

Fig.5. 8 The results of experiment in the sea of Okhotsk	83
Fig.5. 9 The observation point near the Sesoko island	84
Fig.5. 10 The fish ship: Zen-ei maru for using AUV operation and experiment	85
Fig.5. 11 The scene of AUV's carrying to observation point.....	85
Fig.5. 12 The result of experiment in Sesocko (1)	86
Fig.5. 13 The result of experiment in Sesocko (2)	87
Fig.6. 1 The realized system by proposed image processing method	92

表目次

Table 1. 1 The development items to realize the sampling system	10
Table 2. 1 The square areas from Hue and saturation graph.....	39
Table 3. 1 The change of feature number by enhancement method.....	45
Table 3. 2 Accuracy of recognition method.....	51
Table 4. 1 The SSIM values from difference between enhanced images and compression images	67
Table 4. 2 The Maximum Saliency and position in images	69
Table 4. 3 Specification of AUV Tuna-Sand 2 [48].....	71
Table 4. 4 The Specification of acoustic transmitter and receiver for image transmission.....	72
Table 4. 5 The detail of data transmission	74

変数一覧

Variables	Meaning
i	Light intensity
d	Distance
a_λ	Attenuation rate
I	Input image
x, y	Image coordinates
L	Illumination
R	Reflectance
L_R	Estimated illumination by Retinex
R_R	Retinex output
F	Gaussian filter
K	Normalization parameter for Gaussian filter
σ	Gaussian distribution
$*$	Convolution operator
α	Gain parameter for visualization
β	Offset parameter for visualization
O_R	Output image by Retinex
n, m	Input image size -1
S	Surface fitting matrix
P	Parameter vector by least square method

Variables	Meaning
L_S	Estimated illumination by Singh's method
R_S	Estimated reflectance by Singh's method
O_S	Output image by Singh's method
A	Normalization parameter for γ correction
\hat{O}	Contrast enhanced image by γ correction
$\theta_\lambda, (\lambda \in Red, Green, Blue)$	Parameters to rotate hue
$\hat{H}_\lambda, (\lambda \in Red, Green, Blue)$	R,G,B planes by Hue adjustment
$E, (E \in E_{(H)}, E_{(S)}, E_{(B)})$	Hue adjusted image which includes Hue, Saturation, Brightness planes
\hat{E}	Brightness enhancement image
M_{RG}	Color(Red-Green) feature map
M_{BY}	Color(Blue-Yellow) feature map
M_I	Intensity feature map
M_θ	Orientation feature map
G_ψ	Gabor filter
ψ	Phase
TP	True Positive
TN	True Negative
FP	False Positive
FN	False Negative
l	Luminance

Variables	Meaning
I_1, I_2	Input image 1, Input image 2
μ_{I_1}	Average of I_1
μ_{I_2}	Average of I_2
v_1, v_2, v_3	Variables to stabilize the division with weak denominator
c	Contrast
σ_{I_1}	Deviation of I_1
σ_{I_2}	Deviation of I_2
$\sigma_{I_1 I_2}$	Covariance of I_1 and I_2
S	Structure
g	Dynamic range of the pixel-values
u, v, w	Weights

第 1 章

序論

1. 序論

1.1 はじめに

地球表面の約 7 割を占めている膨大な海で、エネルギー資源、鉱物資源、特
集な生態系などが発見されており [1]、科学、環境、資源、漁業などの多様な分
野から注目を集めている。この多様な発見の多くが深海で行われているが、深
海は高圧、低温、暗黒、光と電波の減衰などが存在する極限環境であるため、
調査が容易ではない [2]。近年、海洋工学の発展により大規模の海洋調査が行わ
れている [3] [4] [5]。しかし現状では、一度も調査されてない海域が多く存在し
ており [3]、調査済みの海域でも時と共に環境の変化が生じるため持続的な調査
が必要とされている。即ち海洋の時空間的調査が求められている。膨大な海洋
の時空間的調査を実現には、自動化が不可欠である。そこで深海に耐えながら
調査を行うための水中ロボットが開発されて成果を上げている [6] [7] [8]。現段
階での水中ロボットによる海底調査は、海底の様子を確認するための“観測調
査”と海底に存在するサンプルを採取する“サンプリング調査”が主に行われ
ている。“観測調査”は水中ロボットが調査海域を移動しながら観測（画像撮影
など）を行う調査であり、“サンプリング調査”は水中ロボットが海洋のサンプ
ル（生物、鉱物など）の採取を行う調査である。

本章では、海底調査のための水中ロボット、観測調査及びサンプリング調査、
自律型水中ロボットを用いた次世代海中調査とその実現のための研究課題に関
して述べる。

1.2 水中ロボット

近年、深海を調査するために多様なプラットフォームが開発されており、その中で水中ロボット(Underwater robot)は、有人深海探査艇(Human Occupied Vehicles; HOVs)、遠隔操作型の無人潜水機(Remotely Operated Vehicles; ROVs)、自律型無人潜水機(Autonomous Underwater Vehicles; AUVs)と分類できる [2]。水中ロボットの分類を Fig.1.1 に示す。

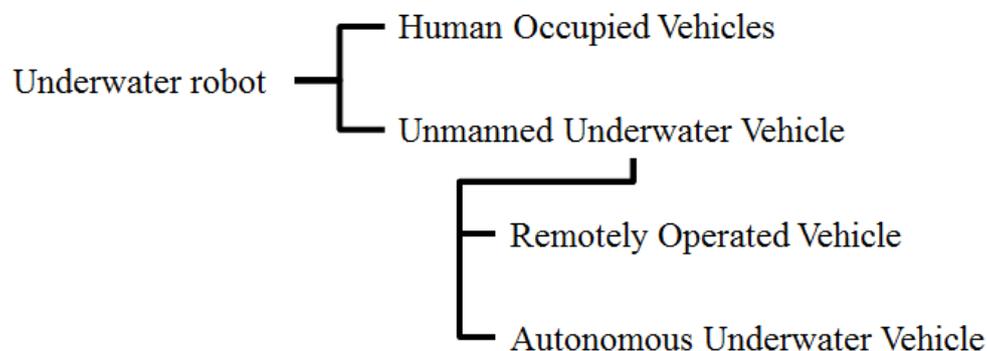


Fig.1. 1 The Classification of underwater robot

1.2.1 有人深海探査艇 (HOV)

少数のオペレーターと科学者を深海まで移動させることができる HOV は、マニピュレーター、カメラ、各種センサーなどを搭載し、海底の観測とサンプル(生物や鉱物など)の採取などの成果を上げている。

日本では、海洋研究開発機構(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)で開発された「しんかい 6500」は名前の通り深海の 6500m まで調査可能に開発されたプラットフォームであり、乗組員 3 人を乗せ 8 時間潜航調査が可能である。「しんかい 6500」の様子を Fig.1.2 に示す。

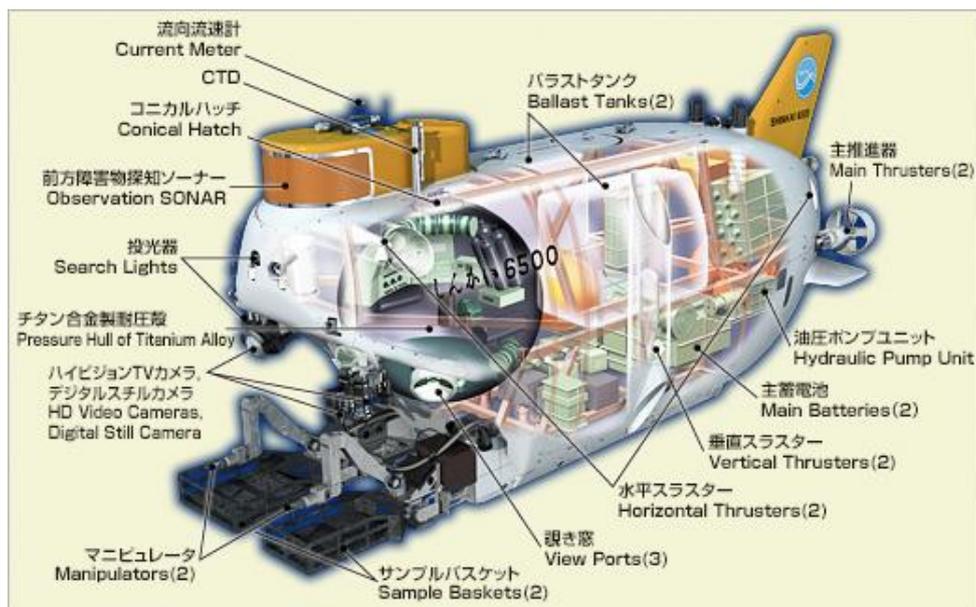


Fig.1. 2 HOV: Shinkai 6500 (JAMSTEC)

(<http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/shinkai6500.html>)

1. 2. 2 遠隔操作型の無人潜水機 (ROV)

ROVは調査船とアンビリカルケーブル(Umbilical cable)で繋がっており、電力の供給と有線通信による操作により調査を行うプラットフォームである。

ROVはアンビリカルケーブルにより通信が可能であるため、高い操作性を持つが、アンビリカルケーブルに繋がっているために、調査の範囲の制約がある。

日本では、JAMSTECの「ハイパードルフィン」などが活躍中であり、マニピュレーター、カメラ、各種センサーなどを搭載し、深海の様子を船上で確認しながら深海のサンプルを集めや、深海底の画像撮影などの成果を果たしている。「ハイパードルフィン」の様子を Fig.1. 3 に示す。

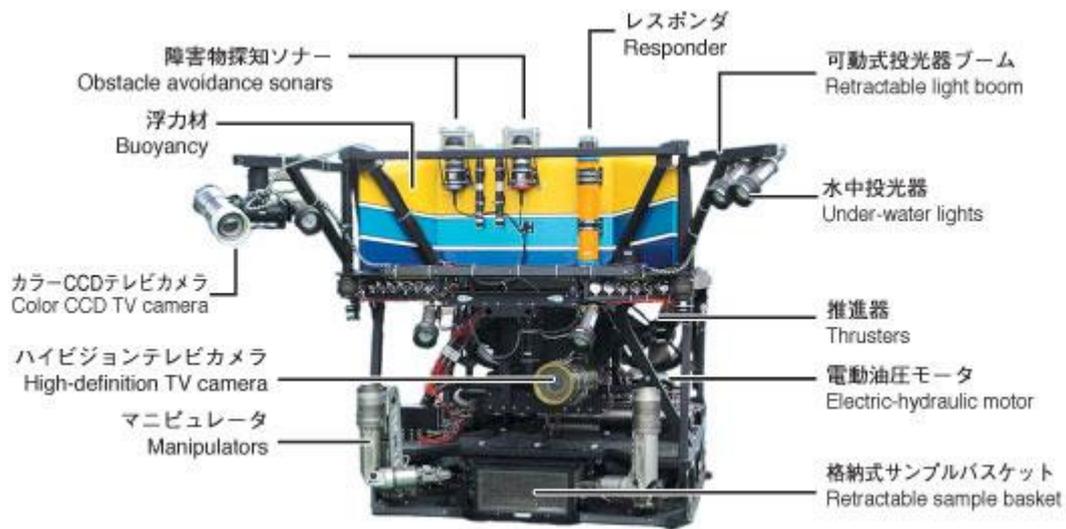


Fig.1. 3 ROV: Hyper dolphin (JAMSTEC)

(<http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/hyperdolphin.html>)

1. 2. 3 自律型無人潜水機 (AUV)

AUV は、外部の電源供給なしで活動するためのバッテリーと、現状（外部環境と AUV の状態）を把握ための各種センサー、与えられた作業を行うための CPU とアルゴリズムが搭載された、最も自動化が進んだプラットフォームである。

AUV は、乗組員の安全を確保する必要も、アンビリカルケーブルによる調査範囲の制約もないため、膨大な海洋を自動的に調べるためのプラットフォームとして期待されている。国内では、「TUNA-SAND」、「TUNA-SAND2」などが東京大学・生産技術研究所(Institute of Industrial Science, the University of Tokyo; IIS)で開発されており、深海底の様子を撮影している。「TUNA-SAND」、「TUNA-SAND2」の様子を Fig.1. 4 に示す。



Fig.1. 4 AUV: TUNA-SAND, AUV: TUNA-SAND2 (IIS)

1.3 水中ロボットによる海底調査

水中ロボットによる海底調査は、大きく観測調査とサンプリング調査に分類できる。観測調査に関しては、HOV、ROV、AUV が利用されている。この中で AUV による観測調査では、調査員安全確保のための調査時間の限りがある HOV や、アンビリカルケーブルによる調査範囲の制約がある ROV と比較して、長時間かつ広範囲の調査ができる。

サンプリング調査では、HOV、ROV が利用されており、ROV は、HOV と比較して、調査員安全確保が必要ないため、多く利用されている。

ROV によるサンプリング調査は、科学者（生物学者、地質学者など）によるサンプリング対象の選択と、オペレーターによる ROV の遠隔操作でサンプリングを行う。本章では、近年行っている AUV を用いた海底観測調査と ROV を用いたサンプリング調査に関して述べる。

1.3.1 AUV を用いた海底観測調査

近年、AUV を用いた海底観測調査が行われており、海底の様子をカメラで撮影するなどの成果を上げている [9] [10] [11] [12] [13]。AUV は、ケーブルによる制約がないため、広範囲の調査が可能であり、乗務員が必要ないため、長時間の調査が可能である。

近年行われている、AUV による深海底画像撮影調査の様子と撮影画像から作成された海底マップを Fig.1. 5 に示す。

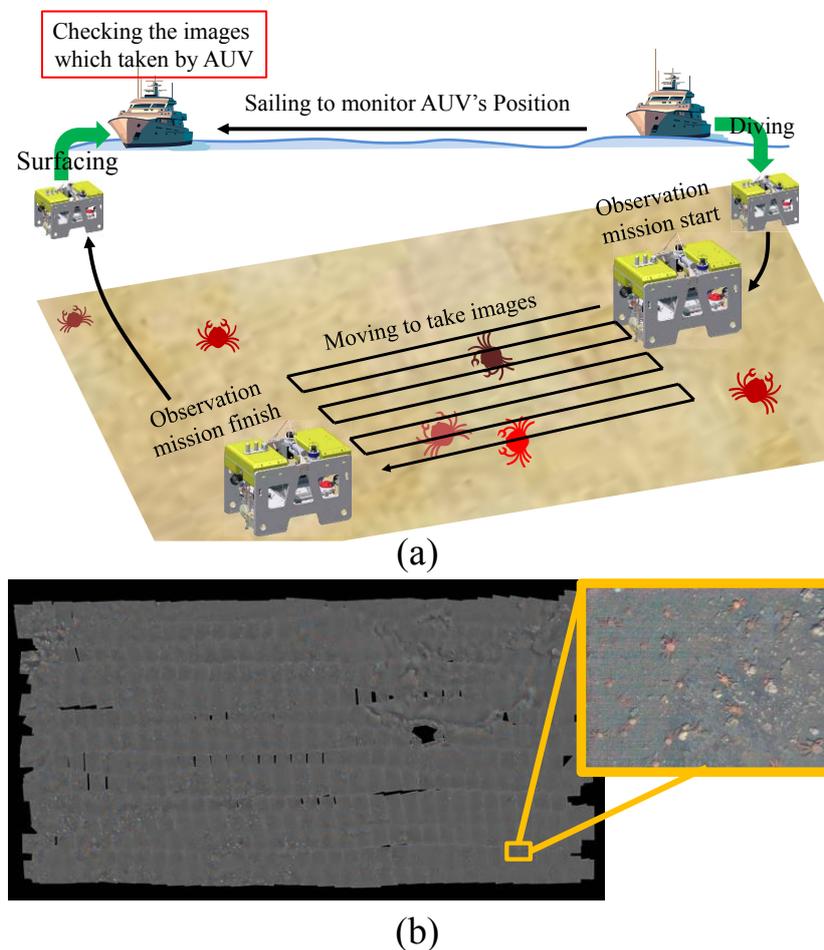


Fig.1. 5 The conventional deep sea floor observation using AUV and the sea floor images map

(a): The overview of deep sea floor observation using AUV,

(b): The composed sea floor image map [11]

Fig.1. 5 (a)は、AUVによる深海底画像撮影調査である。AUVはカメラと光源などを含むカメラシステムを搭載し、調査海域で海底面まで潜航する。その後、目標深度に到達し予めセットされた経路を移動しながら画像を撮影する。観測が終了されると、浮上し支援船で回収する。回収後、撮影した画像データなどの確認を行う。

Fig.1. 5 (b)は、撮影した深海画像から作成されたモザイク画像マップであり、このマップを調べることで、領域内の生態系を調べられる。

1.3.2 ROVを用いたサンプリング調査

ROVによるサンプリング調査は、ROVに搭載されているマニピュレーターによる海底のサンプルを採取し調査を行う。ROVによるサンプリング調査 [2] [14] [15]の様子を Fig.1. 6 に示す。

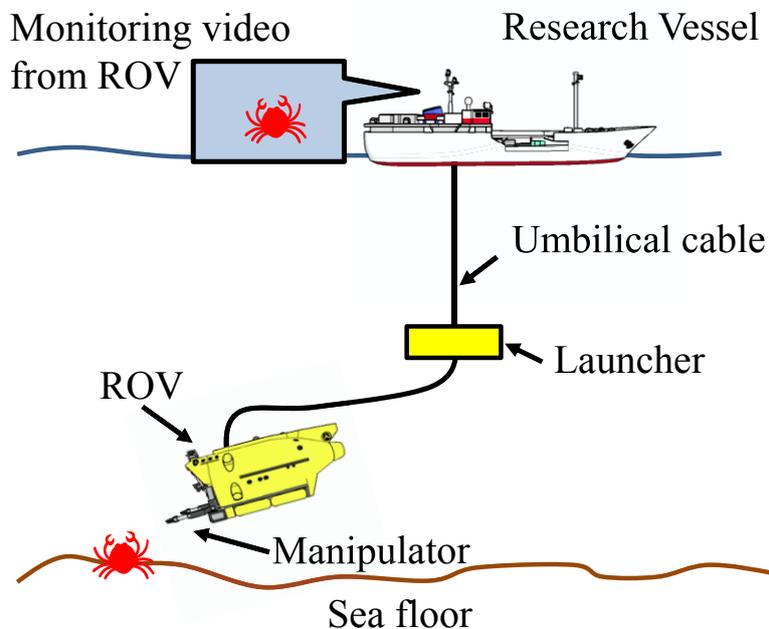


Fig.1. 6 The overview of sampling by ROV

Fig.1. 6 では調査船と ROV がアンビリカルケーブルによる繋がっており、遠隔操作で ROV の移動かつ採取を行う。Launcher は海中の潮の影響を減らすため調査深度近くで展開される。Launcher の展開で、ROV のアンビリカルケーブルにかかる張力を減り、海底での移動を容易にする。

ROV によるサンプリング調査では、調査船上のオペレーターによる ROV の操作と科学者による採取サンプルの選択で採取が行われている。ROV によるサンプリング調査はある地点を調査する場合に有効で利用されている。

1.4 研究目的

地球表面の 7 割を占めている膨大な海の底を効率的に調査するため、広範囲かつ長時間調査が可能な AUV を用いた“海底観測調査”と“サンプリング調査”が高く求められている。

現段階の AUV による深海底観測調査では、AUV が予め決められた観測経路を移動し撮影を行う。この調査では、科学者が詳しく調べたい対象が撮影された場合、例えば、新たな熱水噴出孔、珍しい深海生物、生物産卵の様子などに遭遇した場合でも、その対象の採取や動画撮影など詳しく調べることはできない。遭遇の対象が熱水噴出孔などの移動しない対象であれば、莫大なコストをかけて、同観測地域を調査することも可能ではあるが、遭遇した対象が生物など移動可能であれば、遭遇した際のチャンスを失うことは、科学の進歩に対して大きい失点となる。

そこで、AUV と調査船の無線音響通信で、科学者が AUV により撮影された画像を確認し、調査対象が確認されたら、採取又は動画撮影などを行うシステムを提案する。

本システムの実現には、ハードウェアの開発とソフトウェアの開発で大きく

分類できる。システムの実現のため必要な開発項目を Table 1. 1 に示す。

Table 1. 1 The development items to realize the sampling system

Development of the hardware part	Development of the software part
Sampling-AUV	Underwater image enhancement system
Sampling device	Interesting image selection system
Camera system	Image compression system
Acoustic modem	Image reconstruction system
etc.	Sampling target selection
	Targets tracking
	etc.

Table 1. 1 では、本システムの実現のための項目であり、ハードウェアの開発では、AUV 本体の開発、サンプリング装置の開発、カメラシステムの開発、音響モデムの開発などが必要である。ソフトウェアの開発では、水中画像の補正システムの開発、AUV による画像選択、画像圧縮と復元、採取対象の選択、採取対象のトラッキングなどが必要とされる。本研究では、ソフトウェアの開発に着目し、水中画像補正、画像選択、画像圧縮と復元システムの開発を行う。

水中画像では波長ごとの光減衰により画像内色が青く、更に自然光が届かない深海であれば、ライトの指向性と光量の影響による照明むらが発生する。この問題らを水中画像補正システムにより解決する。また、水中環境では電磁波の減衰が大きいため水中での無線通信は超音波による通信を行う。水中超音波の特性 [2]としては、

- 超音波の伝搬速度は約 1500m/s で電磁波の速度の約 1/200000 である。(低速通信)
- 音響エネルギーは水中での吸収率が大きく、特に高い周波数は急激に吸収

されるため、遠距離の通信では低周波の音波を使用する。(低周波の音波：情報の密度が低い。)

- 海洋の周囲雑音（スラスタ雑音など）の影響を受け、通信距離が低下する。(データ損失が発生)

という特性を持つ。このため、水中での無線通信は低速かつ情報密度が低く更にデータ損失（超音波信号が届いてこない場合）が発生する。このため、AUVは撮影している全ての画像データを送信することは難しく科学者が興味を持つ画像を判断し送る必要がある。また、選択された画像を圧縮し送信することで、低速の影響を減らす必要もある。

船上の科学者が海中で調査している AUV の画像を確認し、サンプルの採取などを行う一連のシステム動作を Fig.1. 7 に示す。

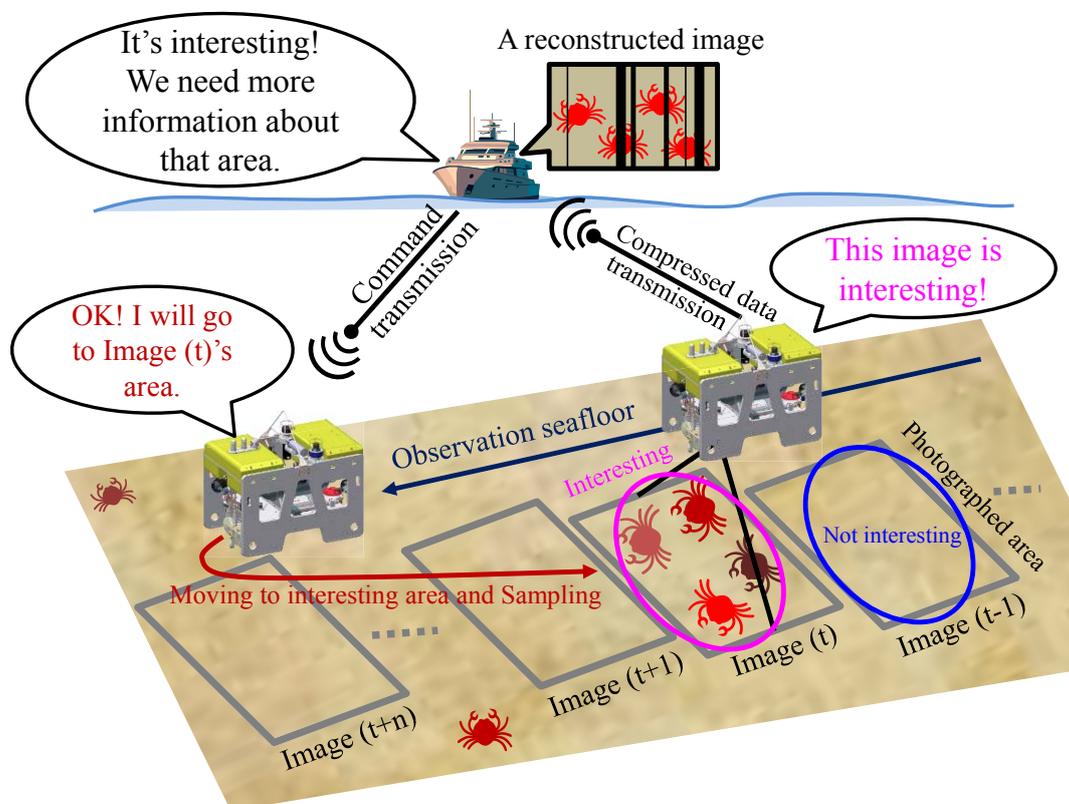


Fig.1. 7 Overview of proposing the ocean exploration system using an AUV

Fig.1. 7 では、AUV は予め決められた観測経路に従い、移動と観測を行う。観測中興味深い対象が撮影された場合、音響通信により画像データを圧縮し送信を行う。音響通信の特性により、AUV が撮影した画像全てを送信することは難しい。このため、AUV は撮影した画像を自ら判断し興味深い対象などが撮影された場合のみ画像を圧縮して送信を行う。音響通信は低速あるため、送信した画像は時間が経過して調査船に受信される。また、データ損失により画像の一部が損失された画像が船上で確認できる。科学者は受信された画像を確認し、調査する価値がある対象が撮影されている場合、AUV に画像が撮影された場所に復帰するように命令を送る。AUV は経路に従った観測を中止し、画像が撮影された位置まで復帰する。復帰後、AUV は対象を認識しサンプリングなどを行う。サンプリングの後、AUV は観測を止めた位置に戻り観測を継続する。

本論文では、提案したシステムの実現するための画像処理技術（深海底画像の補正、AUV による興味画像選択、画像圧縮と復元）に関して述べる。深海底画像の補正を 2 章で、AUV による興味画像選択を 3 章で、音響通信による画像送信を 4 章で説明する。

第 2 章

水中画像 補正技術

2. 水中画像補正技術

水中画像は、水中環境下での光減衰により画像内の色成分が空気中で撮影された画像と比較して大きく異なる。特に赤やオレンジなど波長が長い成分は青や緑などの波長が短い成分と比較して激しく減衰する。更に水深 200m 以上の深度では自然光が届かない暗黒の環境であるため、画像撮影には海底を照らす光源が必要である。しかし AUV などに搭載可能な光源の強度には限りがあり、撮影領域全部を同じ強度で照らすことは困難である。また AUV などのフラットフォームは海底の潮や急な海底地形の変化により海底面までの距離が刻々に変化する。このため、撮影画像内では照明むらが存在し、更に高度の変化と AUV の姿勢などにより照明むらの大きさ、強度、位置が異なる。

本章では、波長ごとの光減衰と照明むらの問題に対して詳しく述べ、それらを補正する深海底画像補正手法を提案する。

2.1 水中ロボットに撮影された深海画像の特性

水中は電波の減衰が地上と比較して激しい環境である。よって、光の減衰が波長ごとに異なる減衰率を持ち起こり [16] [17]、さらに深海と呼ばれる深度 200m 以上の場合は、暗黒の環境になっている。水中環境での色光減衰率は赤光 0.4000、緑光 0.0391、青光 0.0348 であり、水中環境での光減衰に関する近似式を式 (2.1) に示す。

$$i(d)_\lambda = i(0)_\lambda \cdot \exp(-a_\lambda \cdot d) \quad \dots(2.1)$$

i は光の強度であり、 d は距離、 λ は波長、 a_λ は減衰率である。式(2.1)に基づく赤緑青の光減衰の様子を Fig.2. 1 に示す。

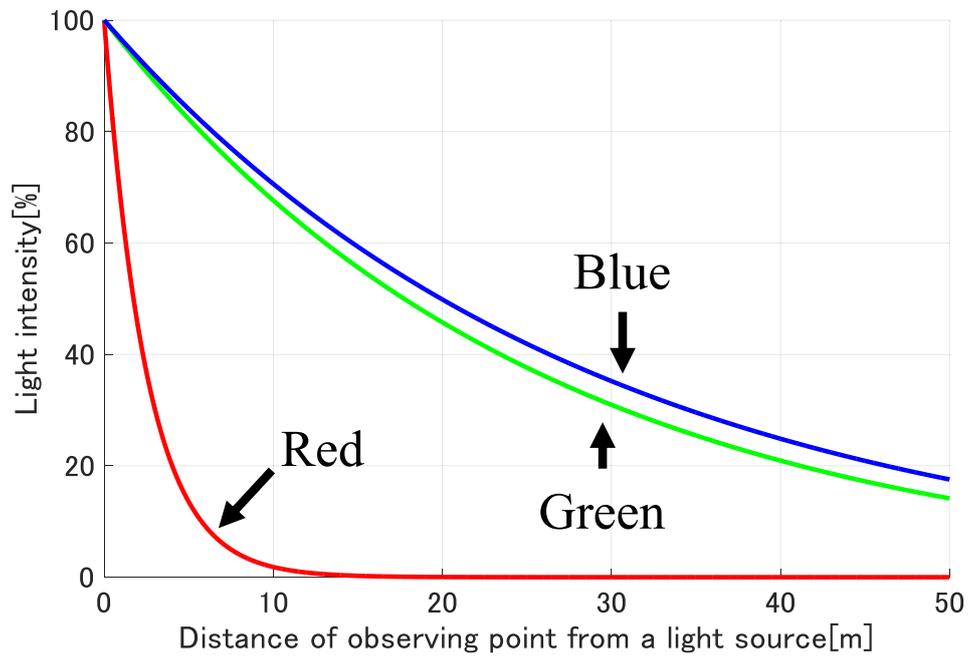


Fig.2. 1 The light about red, green and blue attenuation in underwater environment

Fig.2. 1 の縦軸は光強度(%)であり、横軸は各光を観測した距離である。Fig.2. 1 では光の 3 原色である赤、緑、青の減衰が表れており、特に波長が長い赤光の減衰が激しく、10m 離れては場所では赤光成分の検出が容易ではない。このような特性で、AUV により撮影された深海画像は空気中の画像とは異なる特性を持つ。AUV による深海底撮影の様子を Fig.2. 2 に示す。

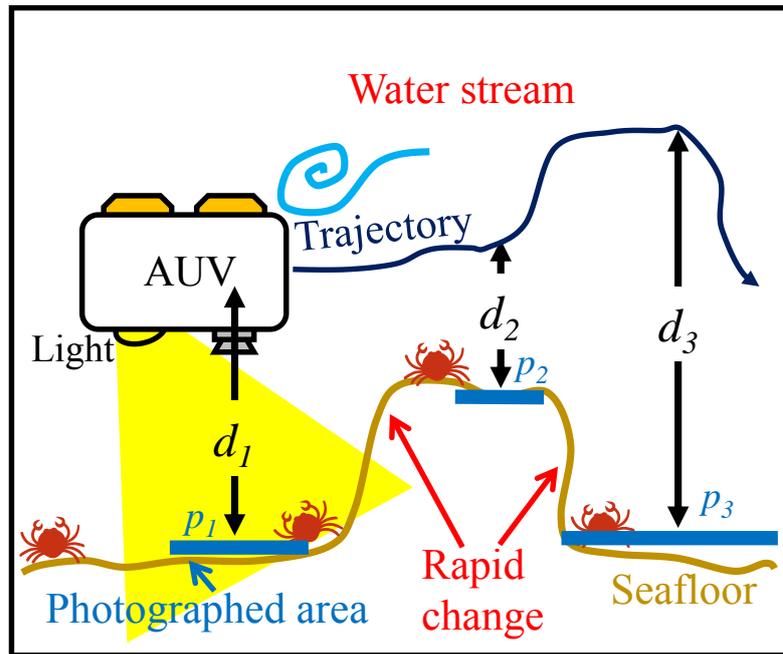


Fig.2. 2 The overview of deep seafloor observation using AUV

AUVは、深海底を撮影するため、光源を含むカメラシステムを搭載している。AUVは海底から一定の高度を維持しながら画像を撮影するようになっているが、深海の潮や急激な海底の変化により、常に一定高度を維持することはとても困難である。このため、Fig.2. 2の d_1 , d_2 , d_3 のように異なる高度で画像が撮影される。この高度の変化により画像の撮影領域も p_1 , p_2 , p_3 のように変化し、また画像内の光強度も異なる。

AUVにより撮影された深海底画像を Fig.2. 3 に示す。

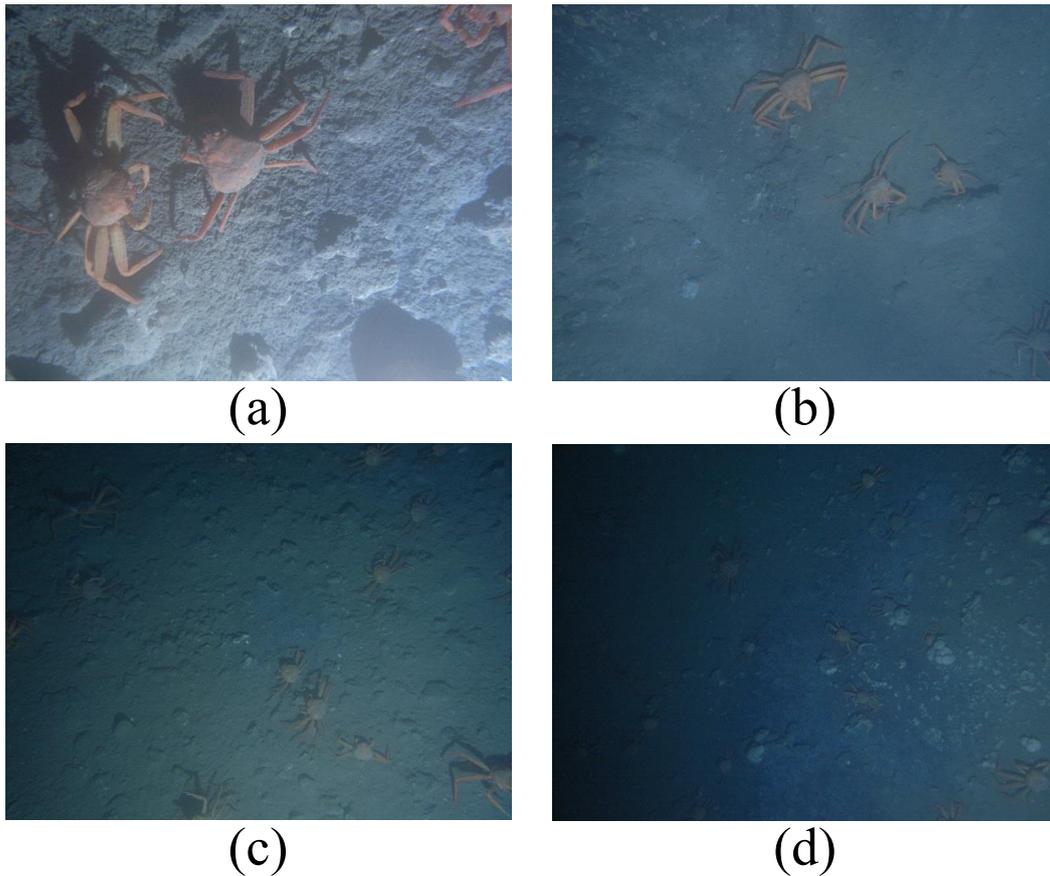


Fig.2. 3 The Deep seafloor images taken by AUV

(a): Deep seafloor image which taken 0.5m

(b): Deep seafloor image which taken 1.9m

(c): Deep seafloor image which taken 2.2m

(d): Deep seafloor image which taken 2.5m

Fig.2. 3 は AUV:TUNA-SAND により、上越市付近のメタンハイドレート区域（深度 900m）で撮影された画像であり、撮影された生物はベニズワイガニである。Fig.2. 3 の(a), (b), (c), (d)は異なる高度で撮影された画像であり、光の減衰により赤などの波長が長い成分が強く減衰しているため、画像全体が青く見えている。(a)は AUV の高度 0.5m で撮影されており、光源を含むカメラシステムと距離が近く、右下が明るく撮影されており、カニの影もはっきり撮影されている。(b)は AUV の高度 1.9m で撮影されており、画像内で光源の影響が同じ

く撮影されている。(c)は AUV の高度が 2.2m で撮影されており、画像内でむらが生じている。光源の影響により右下が明るく撮影されており、左上は暗く撮影されている。(d)は、AUV の高度が 2.5m で撮影されており、画像半分からむらが生じている。光源の影響により右半分は明るく、左半分は暗く撮影されている。

Fig.2. 3 の画像の特性を調べるため、HSB(Hue, Saturation and Brightness)カラー空間を用いて画像の特性を表す。色相彩度カラーグラフを Fig.2. 4 に、明度のヒストグラムを Fig.2. 5 に示す。

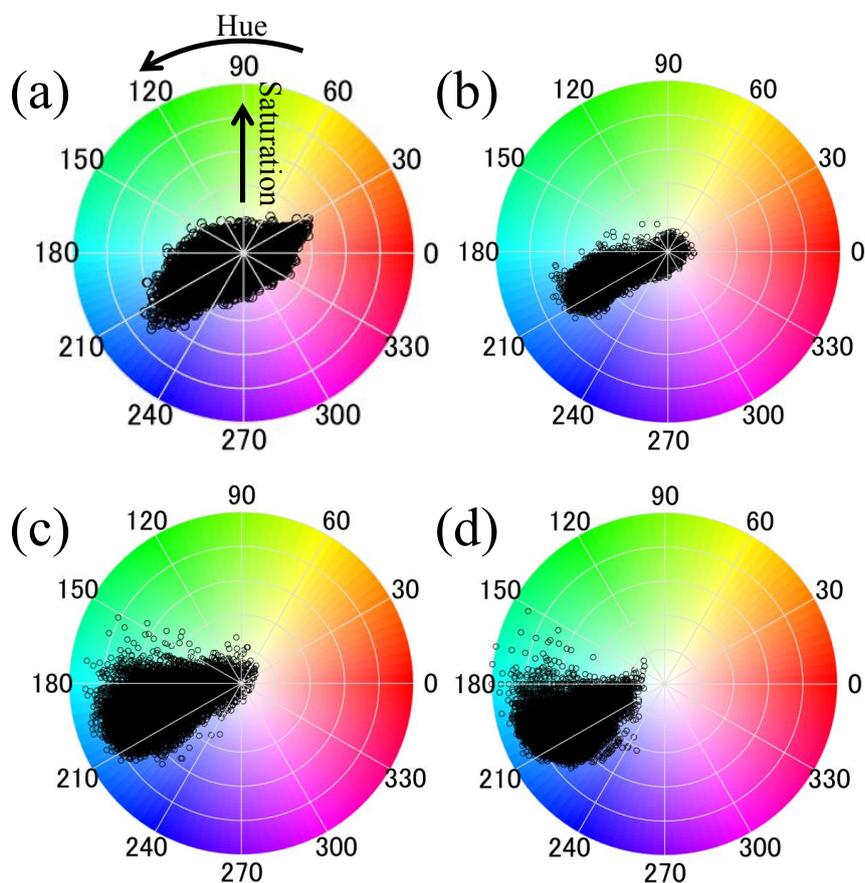


Fig.2. 4 Hue and saturation graphs about images in Fig.2. 3
(a): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (a)
(b): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (b)
(c): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (c)
(d): HS graph about image which corresponds with Fig.2. 3 (d)

Fig.2. 4 の色相彩度グラフでは、時計回転方向が色相の値を表しており、中心から外の方で彩度の値を表す。また、各ピクセルの値は黒円で表現されている。(a)は、比較的近距离で撮影された画像であるため、他の画像と比較してベニズワイガニの身にある赤成分が多く残っている。しかし、(b)と(c)では、赤の成分が大きく減衰しており、更に(d)では、赤の成分が残っていない。色相彩度グラフにより、AUV から撮影された画像の波長による光減衰の特性を確認することができた。

深海画像の照明むら特性のための明度ヒストグラムを Fig.2. 5 に示す。

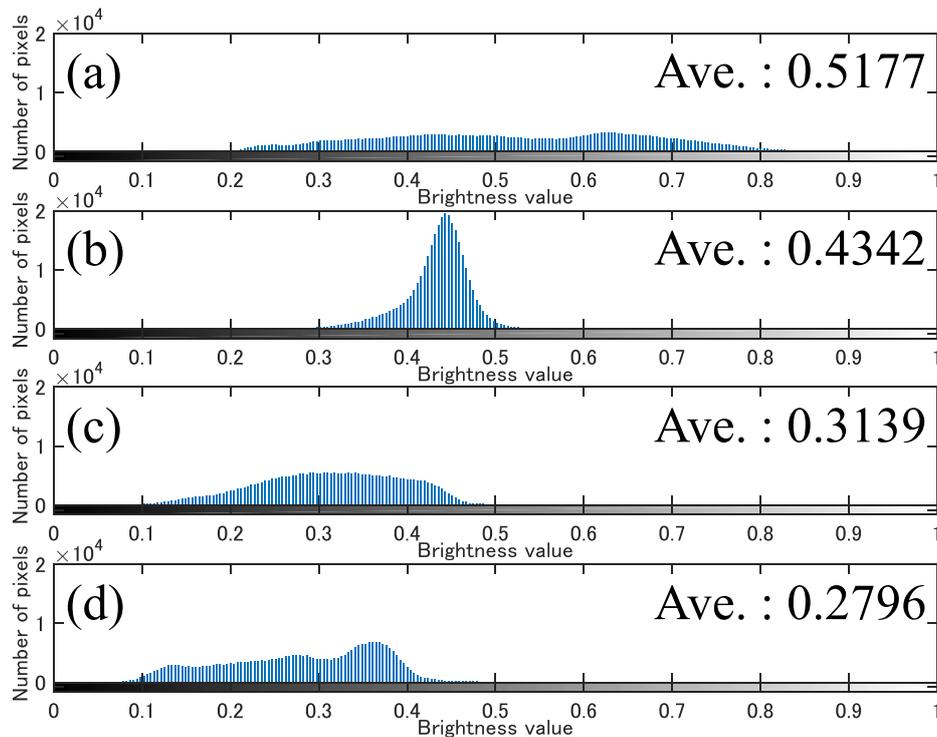


Fig.2. 5 Brightness histograms about images in Fig.2. 3

- (a): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (a)
- (b): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (b)
- (c): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (c)
- (d): Brightness histograms about image which corresponds with Fig.2. 3 (d)

Fig.2. 5 は、明度ヒストグラムであり各ヒストグラムは、縦軸が頻度数、横軸が値である。ピクセルの値は 0 から 1 で正規化されている。明度ヒストグラムは各画像の明度を表すため、ヒストグラムが集まっている画像は、むらが少ない画像である。

(a)は、0.5m の高度で撮影されたため、明るく撮影されている領域と影などで暗く撮影された領域が混在している。(b)はピクセルが 0.43 付近で集中しており、他の画像と比較して、むらが少ない画像である。しかし、(c)と(d)は画像光の減衰により画像が暗く撮影されており、値も広く分布しているため、照明むらが強い画像である。Fig.2. 3 の(c)と(d)の照明むらの特性を詳しく調べるため、RGB カラー空間での検討を行う。Fig.2. 3 の(c)と(d)の RGB カラー空間での特性と画像全領域の輝度変化を Fig.2. 6 に示す。

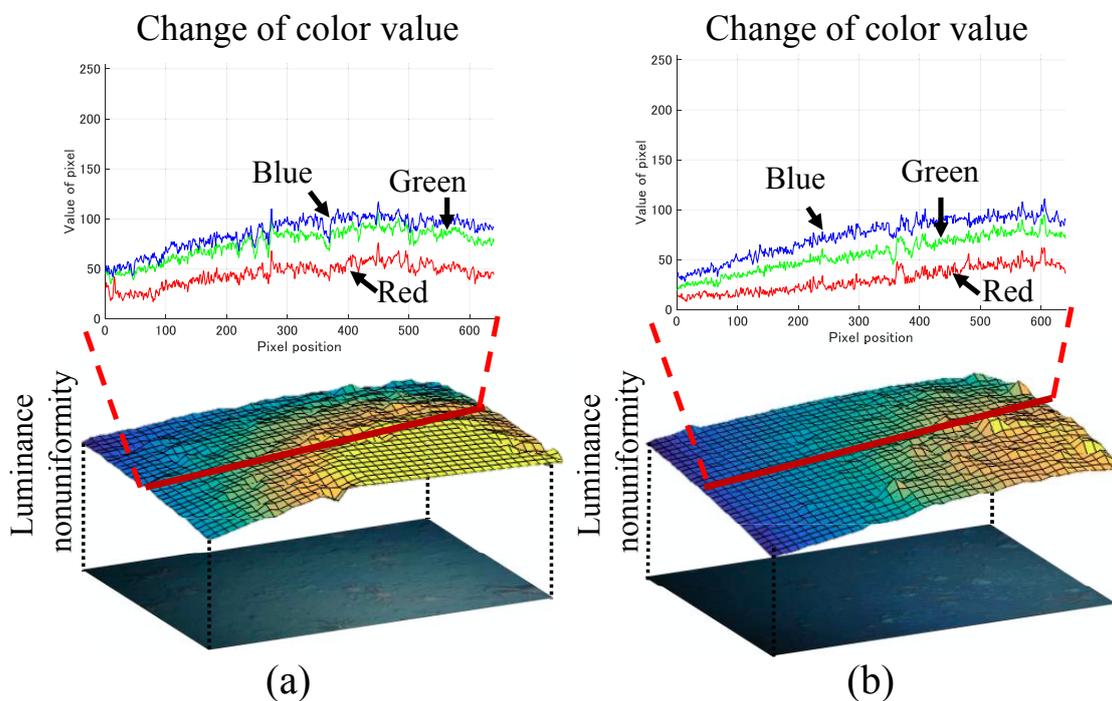


Fig.2. 6 The property of deep sea images about non-uniformed illumination in RGB space and luminance.

- (a): The change of RGB values about non-uniformed illumination in (c) of Fig.2.3
- (b): The change of RGB values about non-uniformed illumination in (d) of Fig.2.3

Fig.2. 6 の(a)は、Fig.2. 3 の(c)の画像の y 軸中心の全 x の RGB 値と、画像全領域の輝度の値であり、(b)は、Fig.2. 3 の(d)の画像の y 軸中心の全 x の RGB 値と、画像全領域の輝度の値である。RGB グラフは、縦軸は 0 から 255 までのピクセルの値であり、横軸は画像の x 軸である。(a)と(b)の RGB 値を確認すると、画像内のむらにより、値の変化が起きていることが確認できる。更に輝度の値により、照明むらの形状が画像ごとに異なることが確認できる。

これらにより、AUV が撮影した画像は、撮影高度の変化により画像ごとに、画像内の色光減衰と照明むらの形状の形状が異なることが明らかになった。

2. 2. 水中画像補正のための関連研究

水中環境から撮影された画像を補正するための関連研究が行われており、McGlamery [18]は水中環境でのカメラシステムの幾何学的位置から色のバランスを向上させるモデルを提案し、Jaffe [19]は McGlamery のモデルを拡張させ、光の散乱(light scattering)まで考慮した Jaffe-McGlamery モデルを提案した。本モデルでは、水中画像は、Direct component, Forward-scattered component そしで Backscatter component の要素により構成される。この要素らを Fig.2. 7 に示す。

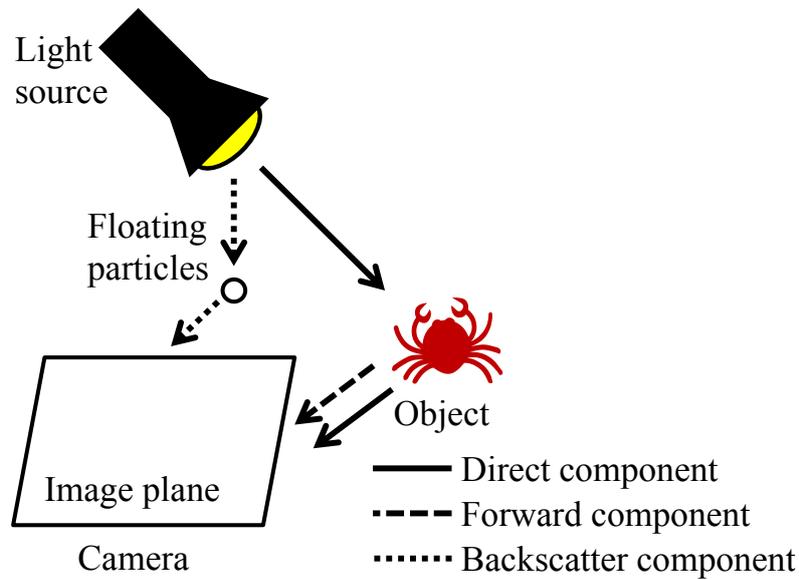


Fig.2. 7 The three components of underwater optical imaging

Direct component は、光源から直接照射された光であり、Forward-scattered component は、光源から照射された光が物体に反射された光で、Backscatter component は、水中に浮いている浮遊物に、光源から照射された光が反射された成分である。Jaffe と McGlamery は水中の画像を補正するに効果的であるが、このためには対象とカメラ光源の正確な位置関係から推定させる。しかし、海底面の観測を目的した AUV への投入を考慮した場合、刻々に変化する位置関係を正確に計測することは容易ではない。

Yamashita ら [20]は水中環境での画像の色復元のため、color registration method を提案した。本手法は水中での色減衰率を考慮したモデルであり、同じ物体を異なる減衰率下で撮影し、比較を行うことで画像内の色を登録し、色減衰を考慮して補正する方法である。本手法は、水中環境で撮影した物体の色を空気中で撮影した色に近く補正することができる。しかし、海底面の観測を目的した AUV への投入を考慮した場合、異なる高度で同じ物体を撮影することは、容易ではないため、現在行われている AUV を用いた観測手法に適用することは

容易ではない。

Iqbal ら [21]は、水中環境での色減衰から光の三原色のバランスを合わせるため、RGB カラー空間でもヒストグラムのストレッチを基にする手法を提案した。しかし、海底面の観測を目的した AUV への投入を考慮した場合、照明のむらによる問題を考慮してない。

Bazeille ら [22]は、照明光による影響の補正、カメラのダイナミックレンジによるノイズの消去、エッジの強化、色の補正を行った。結果として、画像の質が大きく向上されており、演算時間は 1.5 秒(Image size: 512x512, CPU: Pentium 4 3Ghz, Programming language: Matlab 7.0)である。しかし、補正後の画像色は、空気上の色とは異なる可能性がある。

色の減衰と照明むらの問題両方解を決するための画像補正手法に関しては、入力画像を光源からの照明光成分と物体が持つ反射率成分の積にみなし、照明光成分を推定し、画像から排除することで画像を補正するモデルがある。この照明光成分と反射率成分の関係を Fig.2. 8 に示す。

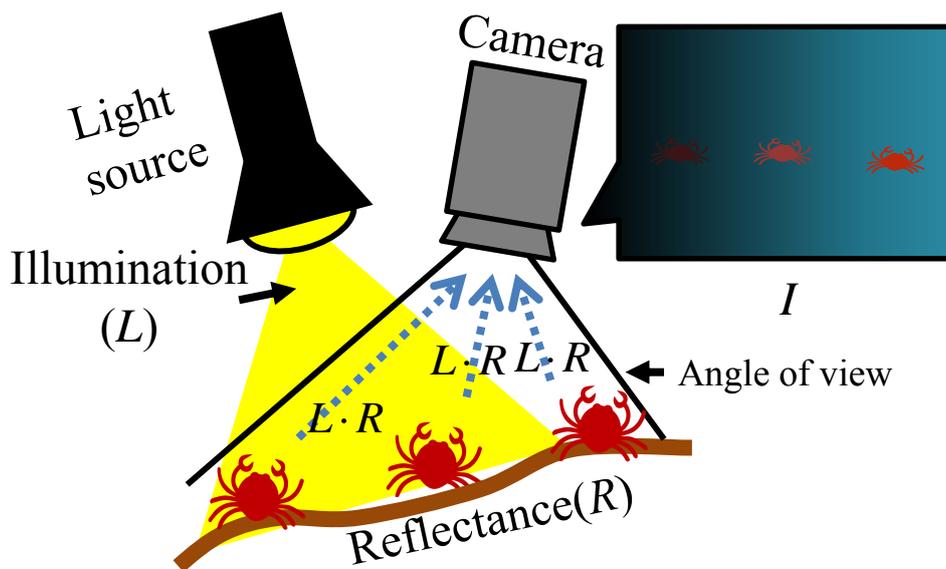


Fig.2. 8 Overview of illumination and reflectance in imaging

Fig.2. 8 では、光源からカニを含む撮影領域を照らし撮影を行っている。光源から照明光成分が照射されており、物体に反射され、物体の元の色成分である反射率成分と照明光成分が共に入る。結果、対象が持つ反射率成分とは異なる画像を取得する。この概念図を表す数式を式(2.2)に示す。

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y) \quad \dots(2.2)$$

I は入力画像、 x, y はピクセル座標、 L は照明光成分であり、 R は反射率成分である。式(2.2)に従うと照明を推定し、排除することで反射率成分が求められる。さらに、反射率成分をスケールリングすることで、照明光成分が排除された画像を得ることができる。式(2.2)に従った画像補正手法は Retinex 理論 [23]と Singh [24]が提案した画像補正手法がある。これらの詳細を次に述べる。

2.2.1 Retinex 理論

Land [23, 25]は 1971 年、人間の視覚システムに基づき色恒常性をモデル化した Retinex 理論を提案し、照明光成分をガウシアンフィルターにより推定する。近年では、Retinex を用いた水中画像補正が研究されている [26] [27]。

Retinex では照明光成分を急激な変化がない低周波の特性を持つ成分であると仮定し、ガウシアンフィルターにより推定を行う。この数式を式(2.3)に示す。

$$L_R = I * F(\sigma) \quad \dots(2.3)$$

L_R は Retinex 理論により推定された照明光成分であり、 F はガウシアンフィルターで、 σ は標準偏差であり、 $*$ はコンボリューション演算子である。

ガウシアンフィルターである F は式(2.4)に示す。

$$F(\sigma) = K \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma^2}\right), \iint F(\sigma) dx dy = 1 \quad \dots(2.4)$$

K は正規化係数である。Retinex 理論に基づき、反射率成分の推定の数式を式(2.5)に示す。

$$R_R(x, y) = [\log L_R(x, y) + \log R(x, y)] - [\log L_R(x, y) * F(x, y, \sigma) + \log R(x, y) * F(x, y, \sigma)] \quad \dots(2.5)$$

R_R は Retinex 出力値である。本理論では、照明光成分である $L_R(x, y)$ は低周波の特性を持っているため、ガウシアンによる平滑化の影響をほとんど受けない。これで $L_R(x, y) * F(x, y, \sigma)$ と等しいと仮定する。その結果の計算式を式(2.6)に示す。

$$R_R(x, y) = \log R(x, y) - \log R(x, y) * F(x, y, \sigma) \quad \dots(2.6)$$

Retinex 出力値は、反射率成分と高周波成分である反射率成分の平滑化した値の比である。Retinex 出力値を画像として表すため、ゲインパラメータとオフセットパラメータによる調整が必要である。この演算を式(2.7)に示す。

$$O_R(x, y) = \alpha(R_R(x, y)) + \beta \quad \dots(2.7)$$

O_R は Retinex による画像であり、 α は画像のゲインパラメータであり、 β はオフセットパラメータである。 α と β のパラメータ決めは、ユーザーによるハンドチューニングが必要とされる。

2.2.2 Singh の画像補正

Singh [24] らは照明光成分を 4 次多項式により近似し推定する方法を提案した。Singh の照明光近似を式(2.8)に示す。

$$\log I = \begin{pmatrix} \log I(0,0) \\ \log I(0,1) \\ \vdots \\ \log I(x, y) \\ \vdots \\ \log I(n, m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x^4 y^0 & x^3 y^1 & \cdots & x^0 y^1 & x^0 y^0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ n^4 m^0 & n^3 m^1 & \cdots & n^0 m^1 & n^0 m^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_{14} \\ p_{15} \end{pmatrix} \equiv \mathbf{SP} \quad \dots(2.8)$$

n, m は入力画像のサイズの-1 であり、 \mathbf{S} は Surface fitting matrix、 \mathbf{P} は最小二乗法によるパラメータベクトルである。 \mathbf{P} を求めるための数式を式(2.9)に示す。

$$\mathbf{P} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \log I \quad \dots(2.9)$$

ここで求まる \mathbf{P} から照明光成分を推定する。この式を式(2.10)に示す。

$$\log L_s = \mathbf{S} \mathbf{P} \quad \dots(2.10)$$

推定した照明光成分を用いて、反射率成分の画像を作成するための式を式(2.11)に示す。

$$O_s = \alpha(\log I - \log L_s) + \beta \quad \dots(2.11)$$

O_s は出力された画像であり、 α は画像のゲインパラメータであり、 β はオフセットパラメータである。

2.3 画像スケーリング手法

Retinex と Singh's method は両方ともスケーリングが必要であり、このため、画像のゲインとオフセットによる調整が必要である。しかし、両パラメータは画像の特性により異なるため、同じパラメータを使用して補正した画像であっても、中の物体のピクセルの値が大きく異なる場合がある。更に、本モデルらは水中環境での色減衰を考慮してないため、近い色で補正は可能であるが、より正確に色を再現するためには、色相調整が必要である。このため、画像の特性（元画像内のピクセル値）に適応可能なスケーリングと色相の補正が必要である。このための手法を Fig.2.9 に示す。

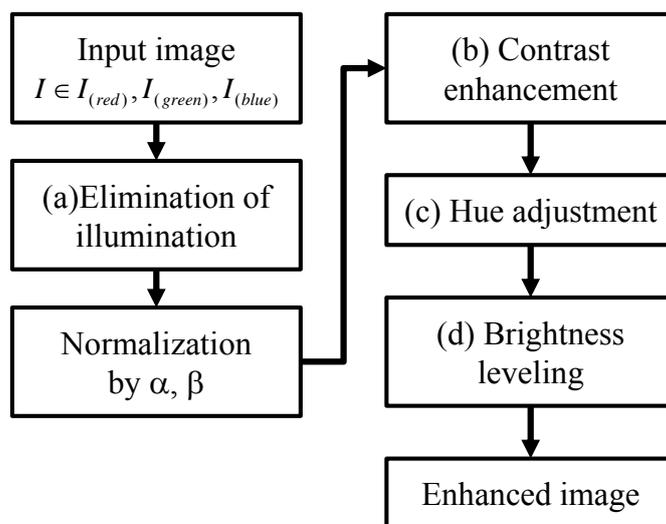


Fig.2. 9 A proposed image enhancement method

Fig.2. 9 (a)は照明光成分を排除した画像である。(a)の画像を $\alpha(128)$, $\beta(128)$ で0から255の間の値に正規化できる。(b)では補正により画像のコントラストを補正し、(c)では、水中での色減衰を考慮し色相の調整を行う。(d)では、画像の明るさを均等に調整する。(a), (b), (d)に関しては、画像補正のため一派的によく利用される手法であるが、(c)は水中での色減衰を補正するための加えた処理である。(c)のコンセプトを Fig.2. 10 に示す。

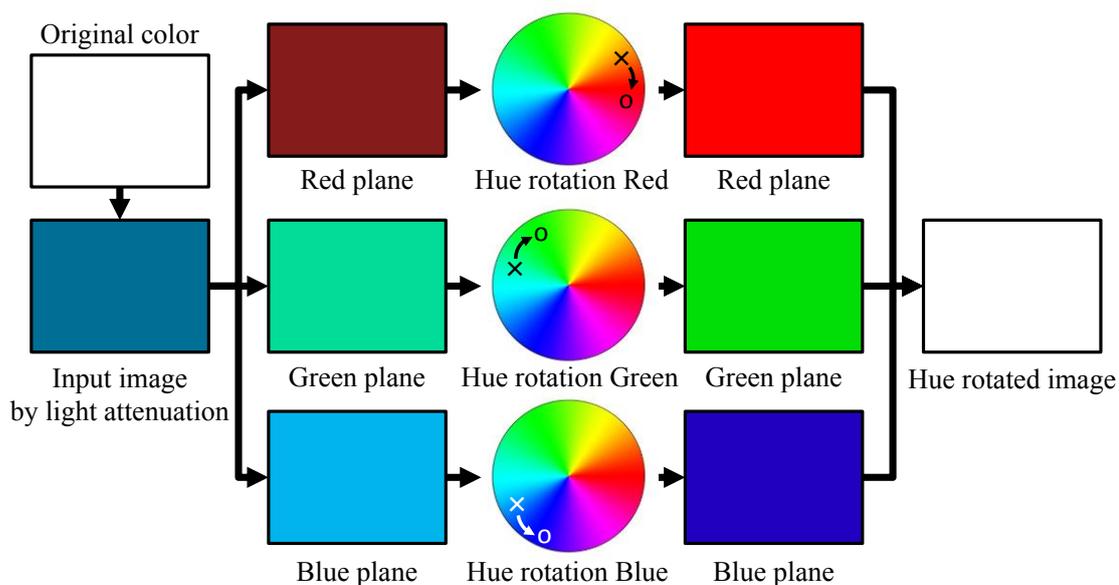


Fig.2. 10 The concept of Hue adjustment

Fig.2. 10 では、水中の色減衰による色の変化を補正する手法である。まず白色 (Original color) を水中で撮影する場合、減衰により (Input image by light attenuation) のような青くらい色となる。減衰された画像を各赤緑青空間に分け、色相空間に変換させることで減衰された画像の各空間の色相値が得られる。各色相値を Original color を参考し色相の値を調整する。その後、各空間を合わせることで Original color に近い色を持つ画像を作成する。

Fig.2. 9 の(b), (c)そして(d)の式を次に述べる。

$$\hat{O}(x, y) = A \times O(x, y)^\gamma \quad \dots(2.12)$$

O は、Ritinx または Singh's Method 出力結果であり、 α, β は 128 の値で正規化された結果、 \hat{O} はコントラスト補正画像である。 A は正規化係数 (ここでは 1) γ は補正曲線の曲率である。 γ はカメラのイメージセンサ、レンズなどにより異なるパラメータを設定する必要があるため、水中環境でのキャリブレーション実験により求める。詳細は 2.2.3 に述べる。次に色相の調整に関する式を式(2.13) に表す。

$$\hat{H}_\lambda = \hat{O}_{\lambda(H)} + \theta_\lambda, \lambda \in (\text{Red, Green, Blue}) \quad (2.13)$$

\hat{H}_λ は各 Red, Green, Blue に分けられた色相(Hue)調整画像であり、 $\hat{O}_{\lambda(H)}$ は \hat{O} の各 Red, Green, Blue に分類した空間の色相である。 θ_λ は色相調整値である。 θ_λ はカメラのイメージセンサやレンズ、照明強度などにより異なるため、実験によりパラメータを求める。詳細は 2.3 に述べる。色相調整された各 Red, Green, Blue 空間を一つのから画像にする。この式を式(2.14)に示す。

$$E = \hat{H}_{\text{Red}} + \hat{H}_{\text{Green}} + \hat{H}_{\text{Blue}} \quad (2.14)$$

E は色相補正画像である。 E を用いて画像の明るさを均等に調整するための式を式(2.15)に述べる。

$$\hat{E}_{(B)}(x_1, x_2) = 0.5E_{(B)}(x_1, x_2) / E_{(B)}^{Avg}, (\hat{E} \in \hat{E}_{(H)}, \hat{E}_{(S)}, \hat{E}_{(B)}) \quad (2.15)$$

$\hat{E}_{(B)}$ は、明度調整された明度空間であり、0.5 は正規化(0~1)された明度の中央値であり、 $E_{(B)}^{Avg}$ は $E_{(B)}$ の平均値である。提案した手法による補正画像は \hat{E} である。

2.4 水中画像補正の有効性評価

Retinex による画像補正と Singh's method による画像補正の比較とスケールリングパラメータ γ と θ_λ を求める。2.4.1 では、Retinex 理論と Singh's method の比較を行う。2.4.2 では、スケールリングのパラメータ γ と θ_λ を求める。2.4.3 では、深海画像への適用と色彩の変化を評価する。

2.4.1 評価実験

実験のためのセットアップの様子と実験環境を Fig.2.11 に示す。

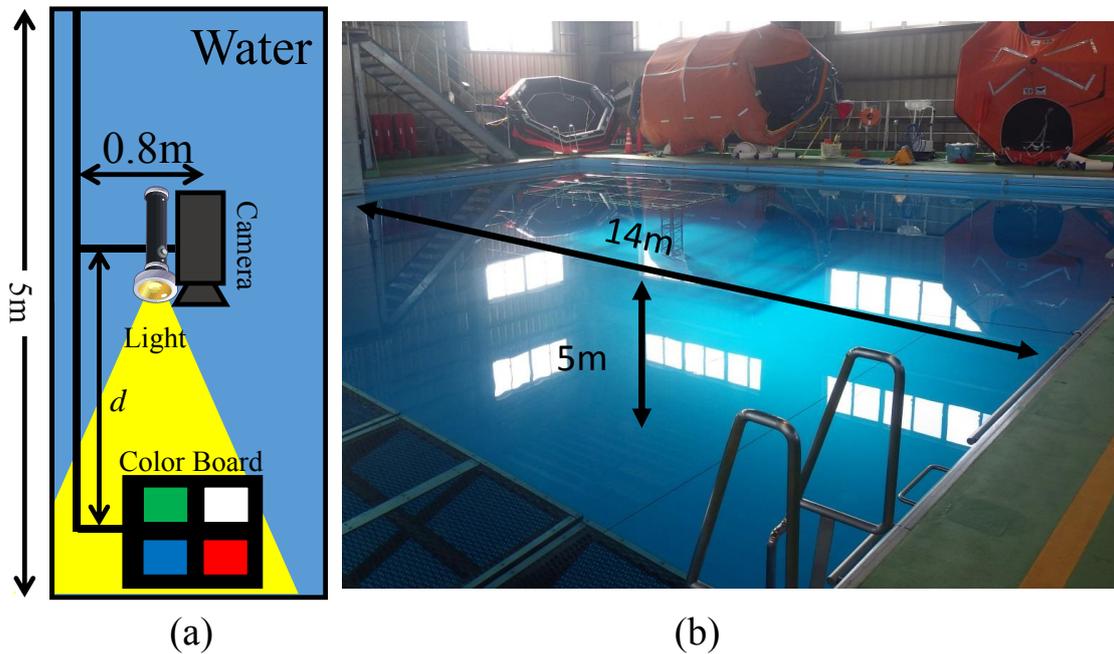


Fig.2.11 A pool environment and experimental setup of color enhancement
(a): An experimental setup, (b): A pool environment

Fig.2.11 の(a)は実験の様子であり、(b)は実験を行った日本サバイバルトレーニングセンター (Nippon Survival Training Center) [28]の水槽である。本実験では、白、赤、緑、青の4色のテンプレートカラーボードを暗黒の水中環境で光源を用いて撮影する。カメラに関しては、CCDカメラ 1280×960の解像度を持つものを使用しており、光源に関しては、500lumenと40度の指向性を持つものを使用した。画像撮影に関しては撮影高度 d を 1.0~3.0 までの距離で 0.5m 毎に撮影を行う。

本実験により撮影された元画像、各手法から推定された照明光、その照明光から補正された補正画像を Fig.2. 12 に示す。

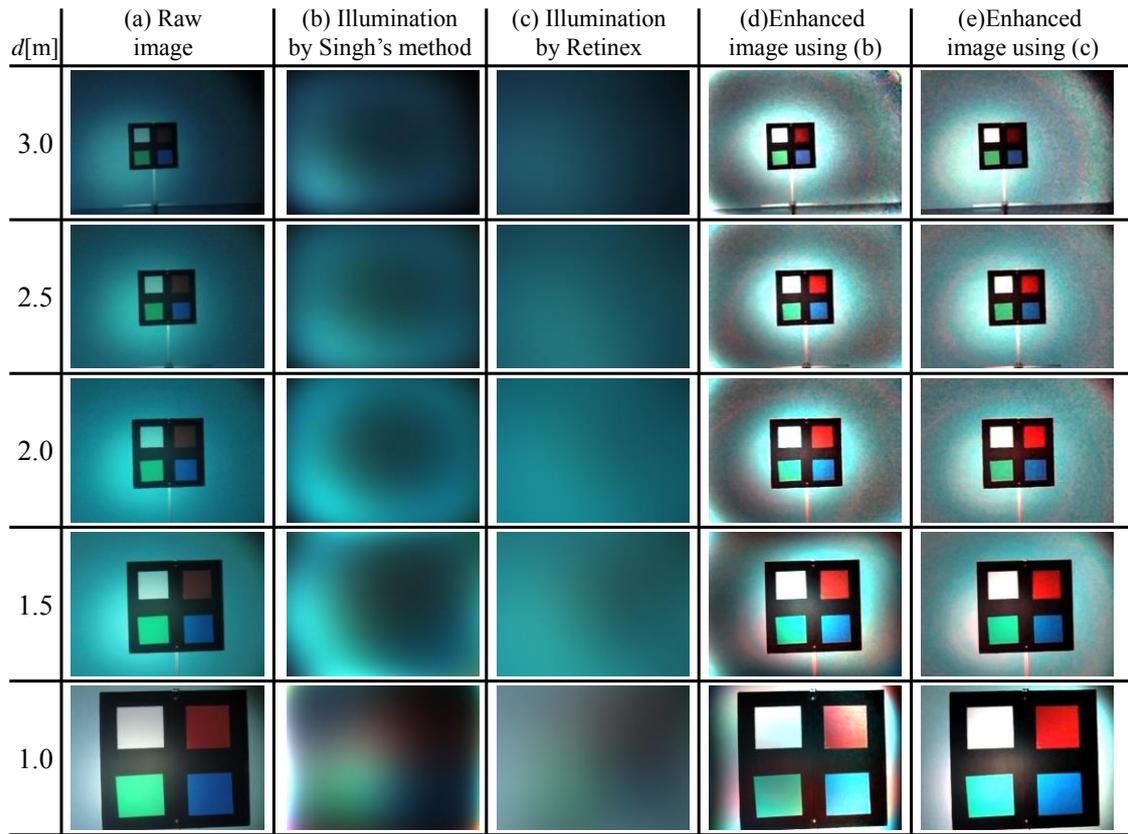


Fig.2. 12 The resultant images by Singh' method and Retinex theory

Fig.2. 12 (a)は撮影された元画像であり、(b)は Singh's method により推定された照明光成分、(c)は Retinex により推定された照明光成分($\sigma: 128$)、(d)は(b)を用いた補正画像、(e)は(c)を用いた補正画像である(Fig.2. 9 の結果)。

(d)と(e)を比較すると両方とも鮮やかなカラーに補正されたことが確認される。しかし、推定した照明光成分には差が存在する。この差の詳細を Fig.2. 13 に示す。

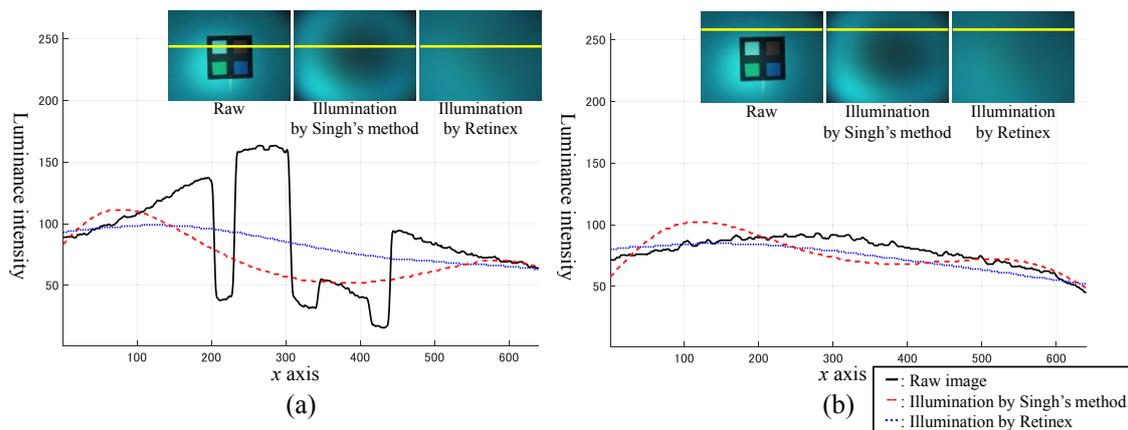


Fig.2. 13 The detail of illuminations by each method

Fig.2. 13 (a)と(b)は、元画像(2.0m で撮影された画像)と Singh's method による照明光成分と Retinex による照明光成分の輝度の値を表す。(a)と(b)は画像内の黄色線の色線の値を表したものである。照明光成分は、急激な変化をせず滑らかに変化すると仮定しており、(a)では、元画像の値の変化に対して、Singh's method は照明光成分を制定できず、画像の最初の所(x 軸 0~150)では、元画像の値とは関係ない変化を見せた。更に白の値の領域(x 軸 230~300)では、画像内赤板の領域に引っ張られ元画像の値とは大きく異なる値を見せた。この急激な変化は正しく照明光成分が推定されたとは言にくい結果である。Retinex により照明光成分に関しては、Singh's method の照明光成分より滑らかな値の変化を見せた。これは、Singh's method より、元画像内の照明光に近い値であることで、(b)に関しても、同様な傾向を見せている。

Singh's method は、Retinex ($\sigma:128$ の場合)より 3 倍速い演算速度を見せたが、AUV による画像撮影は Fig.2. 2 で述べたように高度の変化が予測される環境であるため、光源からの照明光の強度が画像ごとに大きく異なる。

そこで、本研究では Retinex による照明光成分の推定を用いて画像の補正を行う。

2.4.2 画像処理パラメータの算出

Retinex を用いた画像補正の全処理を Fig.2. 14 に示す。

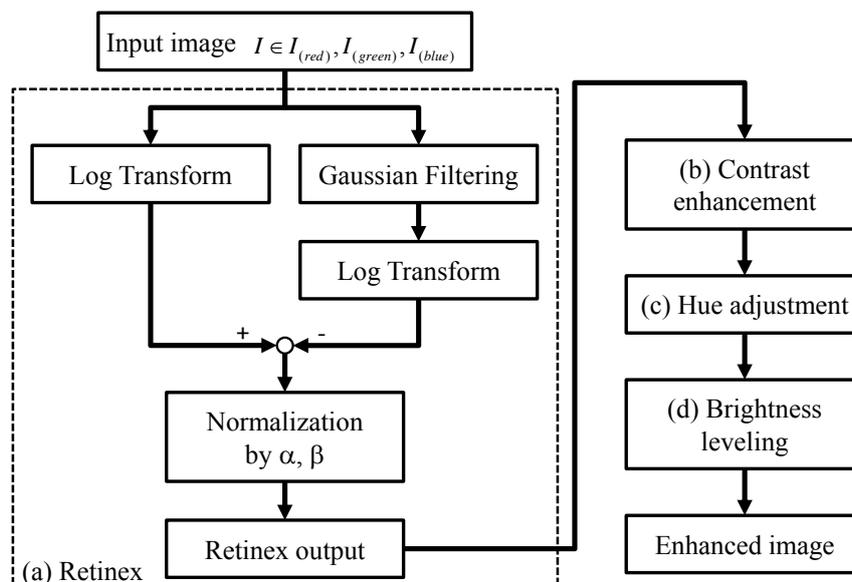


Fig.2. 14 A proposed image enhancement process

Fig.2. 14 (a)は上記した Retinex による処理であり、(b), (c), (d)そして(e)は上記したスケーリングと色彩調整の処理である。本手法により補正されたテンプレートカラーボード画像を HSB カラー空間により分析を行い評価する。(a), (c)に関しては色相(H)のグラフで、(b)と(d)に関しては、彩度と明度のヒストグラムにより評価を行う。テンプレートカラーボード内の各色の色相(H)の撮影距離による変化を Fig.2. 15 に示す。

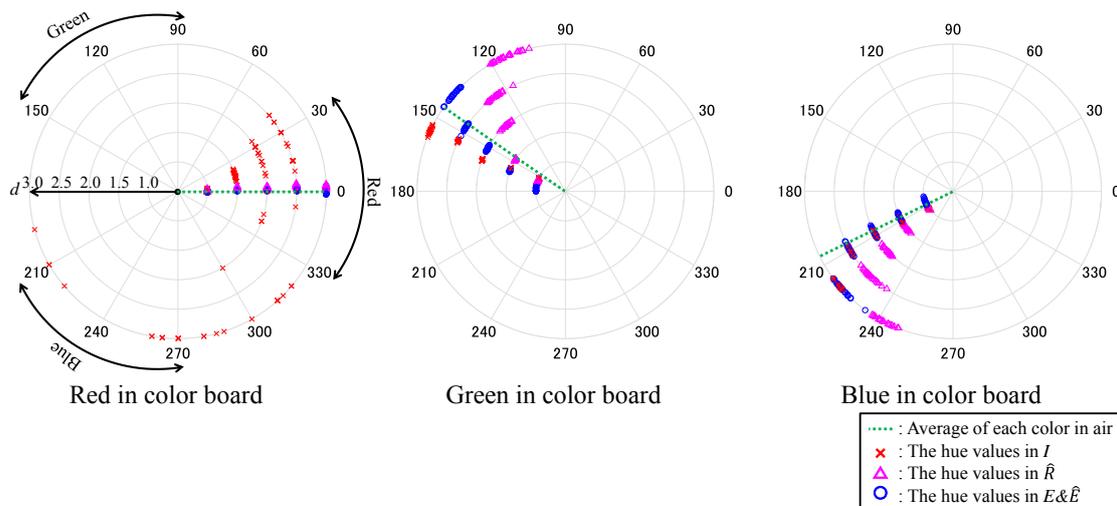


Fig.2. 15 The variations of hue value about altitude on each color by proposed method

Fig.2. 15 では、レートカラーボード内の赤、緑、青の三色の色相値を表したものであり、グラフの角度は色相、グラフの中心から外方向は撮影距離を表す。点線は空气中で撮影したテンプレートカラーボード内の各色の平均色相値であり、×は元画像の各色の色相値、△は Retinex により補正された色相値、○色相調整(Hue adjustment)を含む補正の結果である。各領域は 5×5 の大きさで正規化した画像からの値である。テンプレートカラーボードの中“白色”に関しては、色相(H)と関係なく彩度(S)と明度(B)により決められるため、再度と明度のグラフで述べる。

Fig.2. 15 の“赤色”に関しては、元画像の色相値が大きく減衰しており、 d が大きくなるほど、色相内の赤の値(330~30)とは大きく異なる値を見せた。しかし、Retinex による補正画像は理想的に補正されていることが確認される。このため、“赤色”に関しては色相調整が必要ないことが確認されたため、 θ_{Red} (Fig.2. 14 の(c)のパラメータ)には 0 を使用した。“緑色と青色”に関しては、光の減衰率により最大 3m の水中環境下では、ほとんど減衰してない。しかし、Retinex により補正された“緑色と青色”は、空气中の画像と比較して約 10~30 度の差

を見せた。このため、 θ_{Green} と θ_{Blue} を用いて 20 度回転された結果で空気中の画像の色相と近い値（色相調整画像）を見せた。

次に彩度と明度の変化に関して述べる。彩度と明度のヒストグラムを Fig.2. 16 に述べる。

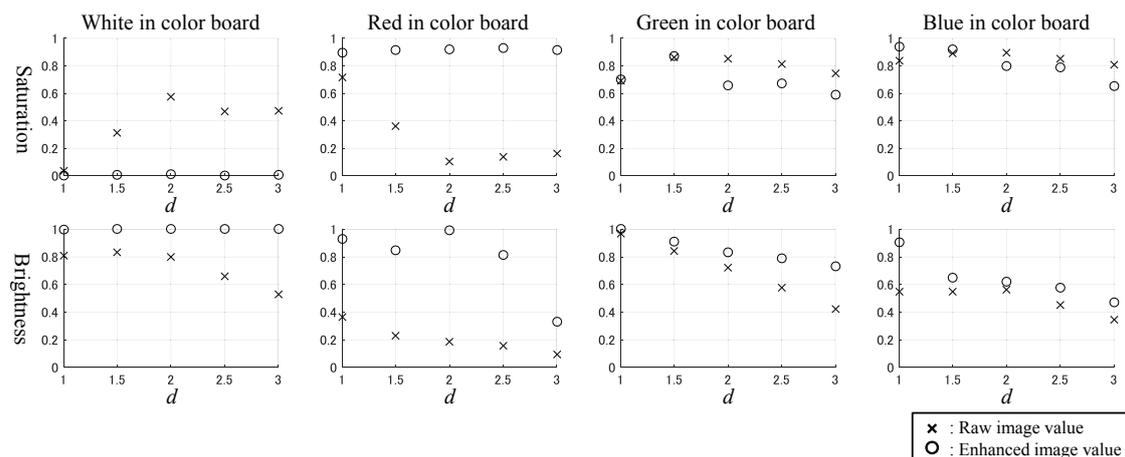


Fig.2. 16 The variations of average of saturation and brightness values by proposed enhancement method

Fig.2. 16 では、上の 4 つにグラフが各色の彩度を表しており、下の 4 つにグラフが各色の明度を表している。各グラフの縦軸は 0 から 1 で正規化された彩度及び明度の値であり、横軸は撮影距離である。×は元画像の値であり、○は補正画像の値(Fig.2. 14 の全て処理後の画像(Enhanced image))である。Fig.2. 16 の白色に関しては、彩度が最小値(0)、明度が最大値(1)にある時、白色として表れる。このため、白色が理想的に補正されていることが確認できる。赤、緑、青に関しては、最大値に近いほど鮮やかで明るい色であり、中央値(0.5)以上であれば、色相の色であると認識できる。このため、 λ (Fig.2. 14(b)のパラメータ)は彩度の値が 0.5 以上になるように設定しており、ここでは 0.25 を用いた。また、明度補正により、多くの値が元画像の値より補正されており、最小値でも 0.5 以上の明度を見せた。

2.4.3 深海画像への適用と評価

Fig.2. 14 で提案した画像補正手法の有効性を示すため、AUVにより撮影された深海画像を用いて適用し評価を行う。深海画像への適用結果画像を Fig.2. 17 に示す。

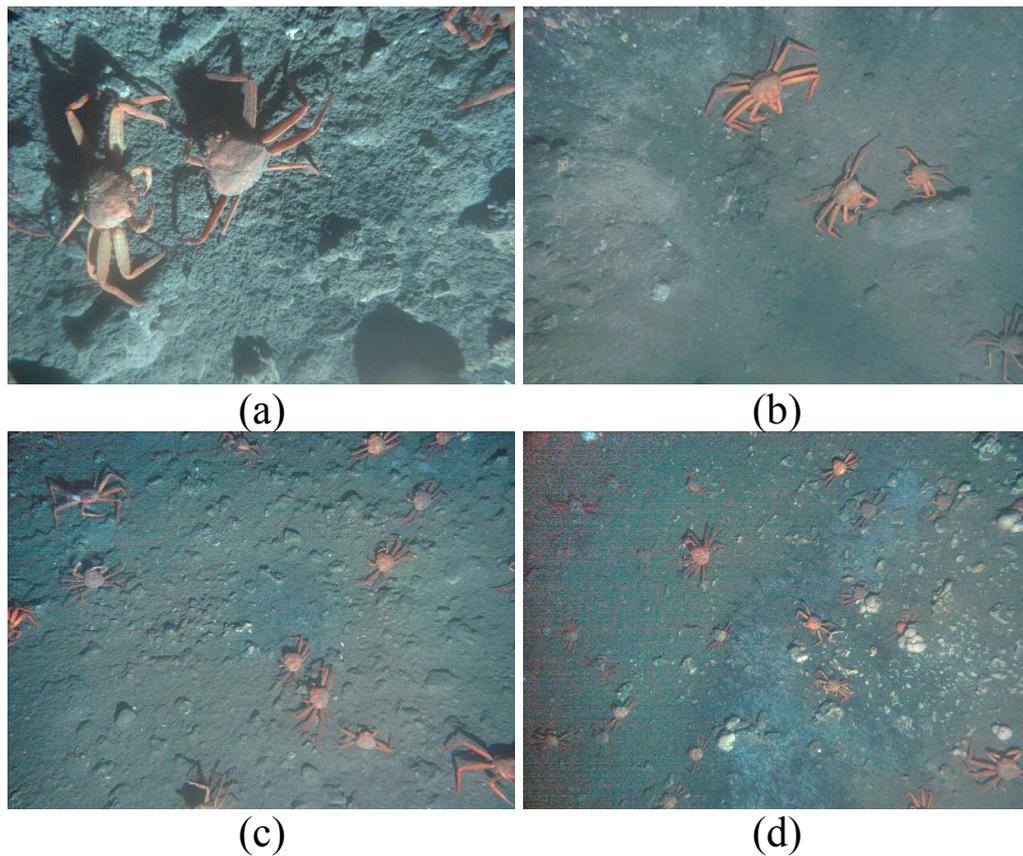


Fig.2. 17 The enhanced images by proposed method corresponding to the image in Fig.2. 3

Fig.2. 17 では、照明むらの排除が確認されており、画像内色も大きく補正されたことが確認される。Fig.2. 14 に示している各処理の詳細の確認のため、Fig.2. 18 に各処理の結果画像を、Fig.2. 19 に色彩グラフと明度ヒストグラムを示す。

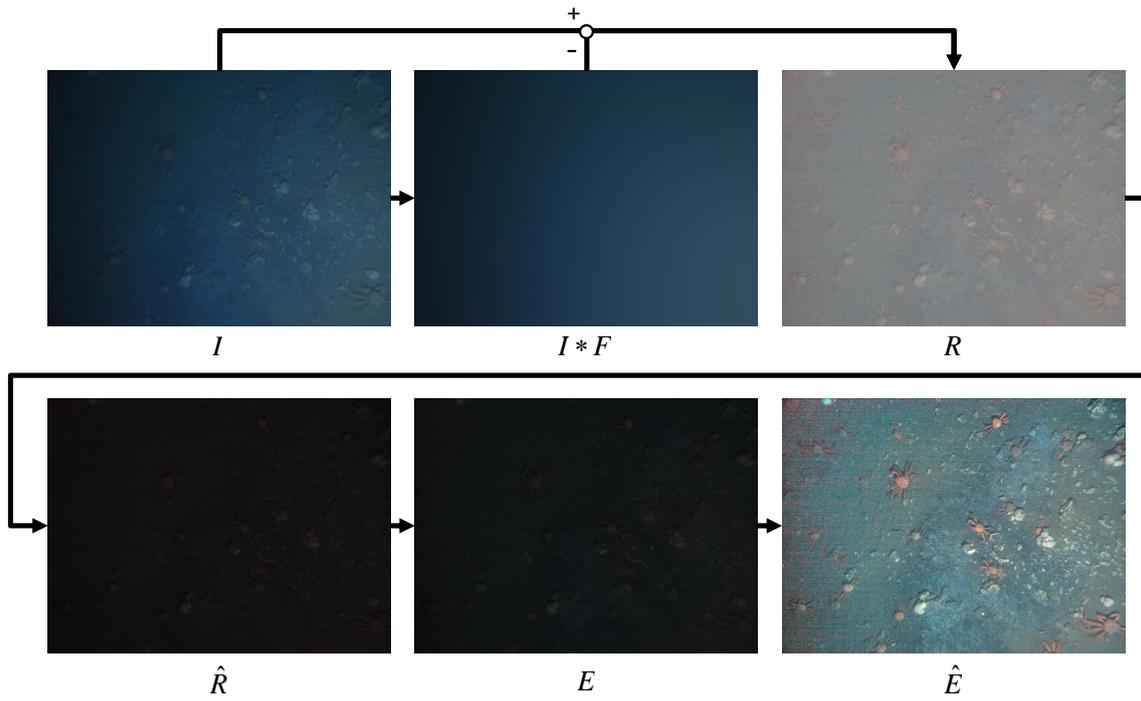


Fig.2. 18 The resultant images by each process in Fig.2. 14

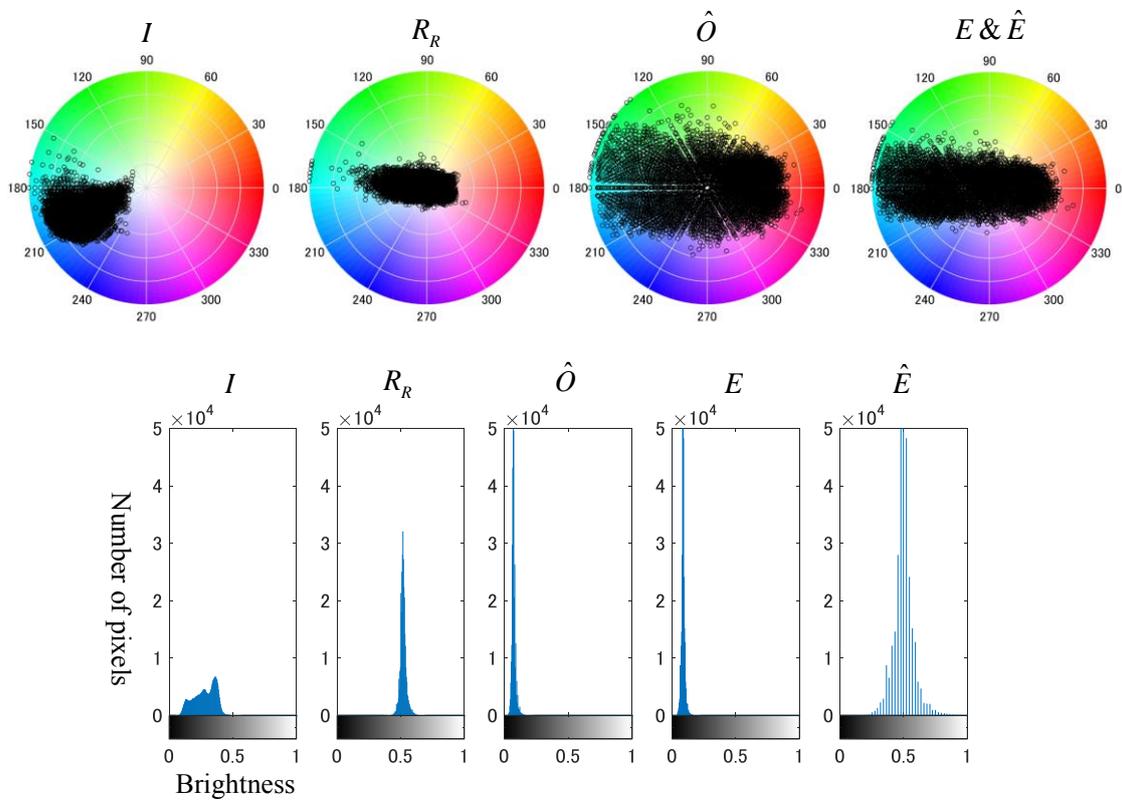


Fig.2. 19 The change of HSB values by the proposed enhancement method

Fig.2. 18 で各処理の結果画像が確認できており、Fig.2. 19 で色彩グラフと明度ヒストグラムの確認できた。

補正手法による色彩変化を確認するため、元画像と補正画像の色彩グラフから、色彩分布領域の確認を行った。色彩領域の確認方法を Fig.2. 20 に示す。

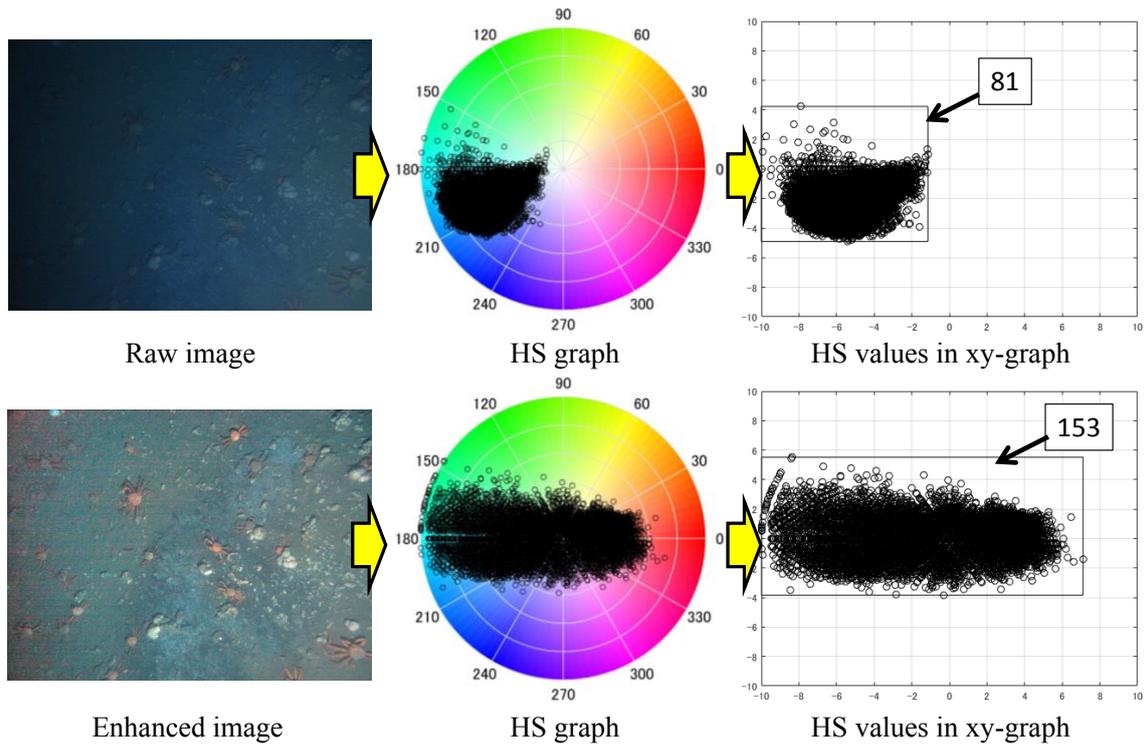


Fig.2. 20 The change of hue and saturation area

Fig.2. 20 では、元画像と補正画像の色彩領域の変化を表している。極座標系で表している色彩グラフ(HS graph)を直交座標系(HS values in xy-graph)へ変換し、各ピクセル値の分布面積を四角で近似する。元画像と補正画像の色彩領域の比較のため、10 枚の画像を選択し、色彩面積を計算した。その結果を Table 2. 1 に示す。

Table 2. 1 The square areas from Hue and saturation graph

images	01	02	03	04	05
Raw	104	72	72	90	80
Enhanced	153	170	153	180	136
images	06	07	08	09	10
Raw	72	64	81	70	72

Table 2. 1 で 10 枚の元画像と補正画像を調べた結果、元画像の平均色彩面積は 78、補正画像の平均色彩面積は 155 であり、画像補正により約 2 倍色彩面積が増加した。色彩面積の増加は、画像を構成している色相の増加とコントラストの増加を意味するため、面積が大きい画像は、人間にとって見やすい画像となる。

2.5 考察

本章では、海底画像の特性である“色の波長ごとに異なる光減衰”と“照明むら”の補正を行った。撮影された画像は、照明の影響である照明光成分と物体が持っている色成分である反射率成分の積で構成される。このため、画像から照明光成分を推定し、排除することで画像内の照明むらを排除と色の補正を行う手法が提案されている。本章では、照明光成分の推定のための手法である Retinex 理論と Singh が提案した手法の比較を行った。Retinex 理論では、照明光成分を推定するためガウシアンフィルターを用いており、Singh は 4 次の多項式による近似を行った。

両手法の比較の結果 4 次関数による近似はガウシアンフィルター ($\sigma : 128$) による推定より約 3 倍速い演算速度が確認された(Image size: 640x480, CPU: Intel Core i7-4700MQ 2.40GHz, Program language: Matlab 2016a)。しかし、推定された照明光の詳細を確認した結果(Fig.2. 13)、Singh の手法では 2 つのピークが、Retinex は 1 つのピークが確認された。実験では一つの光源を使用したため、照明光は一つのピークを持つ。そこで、本研究では、現在 AUV による画像撮影が 5 秒に一回行われている点を考慮し、演算速度より画像の質を優先するため Retinex を用いた。

水中環境での光減衰による画像色成分の変化補正のため、色彩の補正を行った。補正では、 γ 補正によるコントラスト補正、水中の赤緑青の減衰に基づいた色相の補正、明度補正で構成されており、補正結果では画像内の色彩領域が約 2 倍増加した。演算時間は、0.5 秒であった(Image size: 640x480, CPU: Intel Core i7-4700MQ 2.40GHz, Program language: Matlab 2016a)。

この結果により、本研究で提案した補正手法の有効性が示された。

第3章

興味画像の選択

3. 興味画像の選択

水中環境では、電波の減衰により高速電波通信を用いることが出来ず、音響通信が行われる。音響通信の特徴としては、1) 超音波の伝搬速度は約 1500m/s で、電磁波の速度の約 1/200,000 である。従って情報の伝達速度が遅い。2) 音響エネルギーの吸収が大きい。特に、高い周波数では、吸収が大きいため、遠距離通信では、分解能が低い低周波音波を使用する。従って、信号の情報密度が低い。3) 海洋の周囲雑音（スラスタや他音響雑音など）の影響により、音響信号の伝達距離が低下する。このため、AUV が撮影した全ての画像を支援船に送信することは難しい。生物などが撮影されている興味深い画像を AUV が選択し送信する手法を提案する。

本章では、AUV による画像選択に関して、“対象認識による画像選択方法”と、人間の“注意モデルによる画像選択方法”を提案する。“対象認識による画像選択”は、調査海域に関する情報が蓄積されている場合、即ち、調査海域の海底画像が存在し、生物認識のためのデータベースを作成することが可能である場合利用できる。また、“注意モデルによる画像選択”は、画像内の対象が何かは認識せず、画像内領域の変化を比較して急激な色情報の変化、エッジの角度などの変化がある領域が存在する画像を興味として選択する方法がある。この方法は、生物認識のためのデータベースを作成するほどの画像がない場合や、調査する対象が特定生物ではなく海域の場合利用できる。

“対象認識による画像選択方法”に関しては、海藻の認識 [29]や魚の認識 [30, 31, 32, 33]などが従来研究されているが、本研究では、主にカニ類を調査の対象としており、生物の形状的特徴が大きいため、これらの認識手法をそのまま利用することは容易ではない。そこで、対象の幾何学的特徴から固有の特徴量を検出する Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [34]アルゴリズムと、検出された

特徴量のクラスタリングにより、対象の幾何学的特徴のデータベースを作成する Bag of Keypoints (BoK) [35] アルゴリズムを用いて対象の認識と分類を行う。

“注意モデルによる画像選択”に関しては、認知心理学に基づく注意モデルである顕著性マップ(Saliency map) [36]を用いる。本モデルでは、ある画像から人間の注意を引く領域を定量的に表すモデルである。本画像選択では、複数の画像と比較し、一番注意を引く画像を選択する。

“対象認識による画像選択方法”の詳細を 3.2 に、“注意モデルによる画像選択”の詳細を 3.3. に示す。

3.1 対象認識による画像選択

3.1.1 対象認識

コンピューター工学の発展に伴い、入力画像から対象を認識する様々な手法が提案されている [37]。そこで、Lowe らにより提案された SIFT [34]は、対象のサイズ、回転の変化にある程度不変な特定と持つ特徴量を記述する。この特性は、海中から鉛直に撮影した画像から対象を認識するために必要な特性である。

しかし、深海底画像は画像内のピクセルの強度が低く、また照明むらの影響で画像内の位置によって同じ物体でもピクセルの値が大きく異なる。この問題は、2章に述べた画像補正により解決できると判断し、Fig.3. 1 に AUV により撮影された元画像と補正画像を用いた検出された SIFT 特徴点の数の比較を行う。

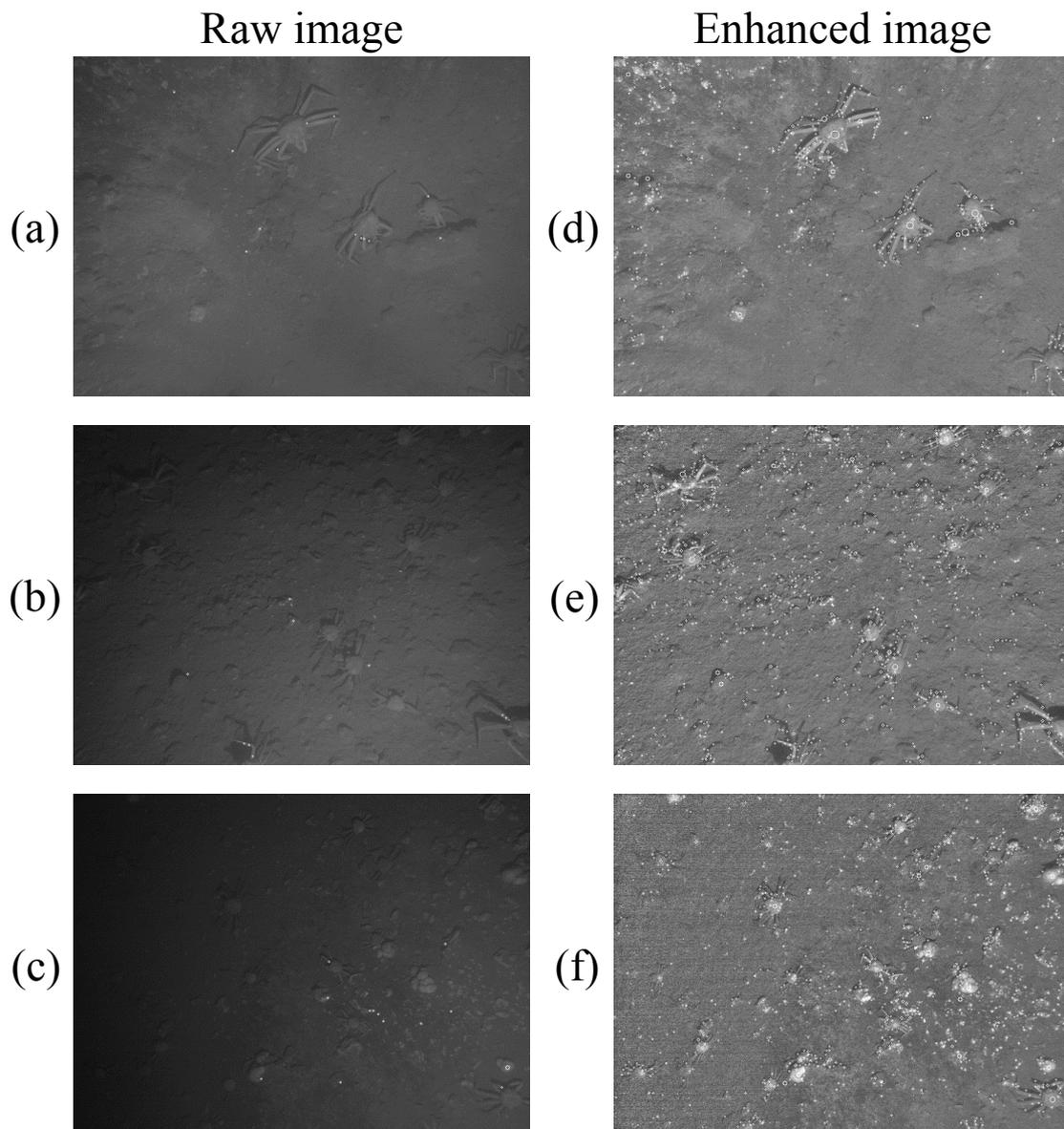


Fig.3. 1 The processed results using SIFT descriptor

**(a): Gray image which is taken 1.9m, (b): Gray image which is taken 2.2m,
 (c): Gray image which is taken 2.5m, (d): Enhanced gray image which is taken 1.9m,
 (e): Enhanced gray image which is taken 2.2m, (f): Enhanced gray image which is taken 2.5m**

各画像内の白点は特徴点の位置である。SIFT パラメータは、Octave layers: 3, Contrast threshold: 0.04, Edge threshold: 10, Sigma: 1.6 である。(a), (b), (c) では、特徴点の数が少ないが、(d), (e), (f)では、ピクセルの値の補正と照明むら

の排除により特徴点が大きく増加した。特徴点数の変化の詳細を Table 3. 1 に示す。

Table 3. 1 The change of feature number by enhancement method

	Feature number		Feature number
(a)	25	(d)	715
(b)	16	(e)	1820
(c)	24	(f)	1480

Table 3. 1 により、画像補正による特徴点数は平均約 61 倍増加した。本実験での特徴点数の増加は、各特徴点を持つ特徴量質の上昇を直接意味する訳ではない。しかし、補正画像では、カニ領域周辺に多数の特徴点が位置しているため、元画像よりカニの認識が容易になる。この結果から、補正画像、SIFT 特徴量、そして特徴量のクラスタリング手法である BoK を利用し対象認識が可能であると判断する。

3. 1. 2 提案する対象認識アルゴリズム

本章では、AUV により撮影された深海画像を用いてベニズワイカニの認識アルゴリズムを提案する。本手法には、大きく対象候補領域を選択する Image Segmentation と、候補領域から対象かどうかを分類する Classification of Marine Life に分けられる。

Image Segmentation に関しては、補正された画像の色を用いて対象候補の領域を分類する。Image Segmentation の詳細なプロセスを Fig.3. 2 に示す。

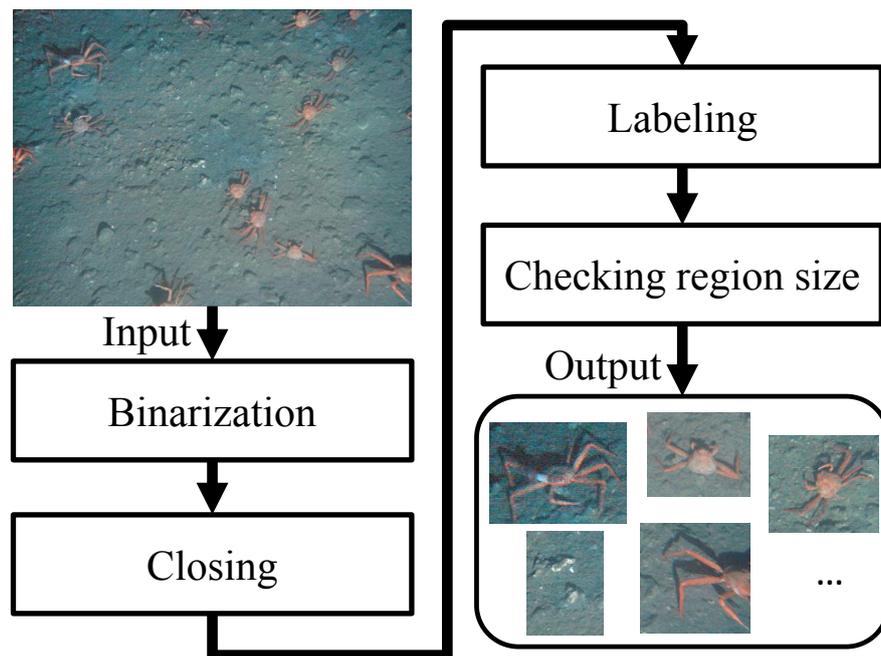


Fig.3. 2 The flow chart of image segmentation process

Fig.3. 2 では、Image Segmentation の各処理を表しており、Binarization では、画像の二値化を行う。二値化はある閾値を用いて閾値以上と以下の二つの値に画像ピクセル値を変換する処理である。ここでは、補正された画像の海底面の値を調べて閾値として利用し、海底面とそのほかに分類を行った。Closing は、画像内の細かいノイズを排除するための処理で、二値化画像内のピクセルを収縮し、膨張させる処理である。収縮と膨張の数は対象のピクセル数から推定して決める。Labeling は、二値化された領域に番号を与える処理であり、Checking region size は、各領域のピクセルの数が対象と比較して大きすぎる場合、または小さい場合、候補領域から排除する処理である。これらの処理の結果を Fig.3. 3 に示す。

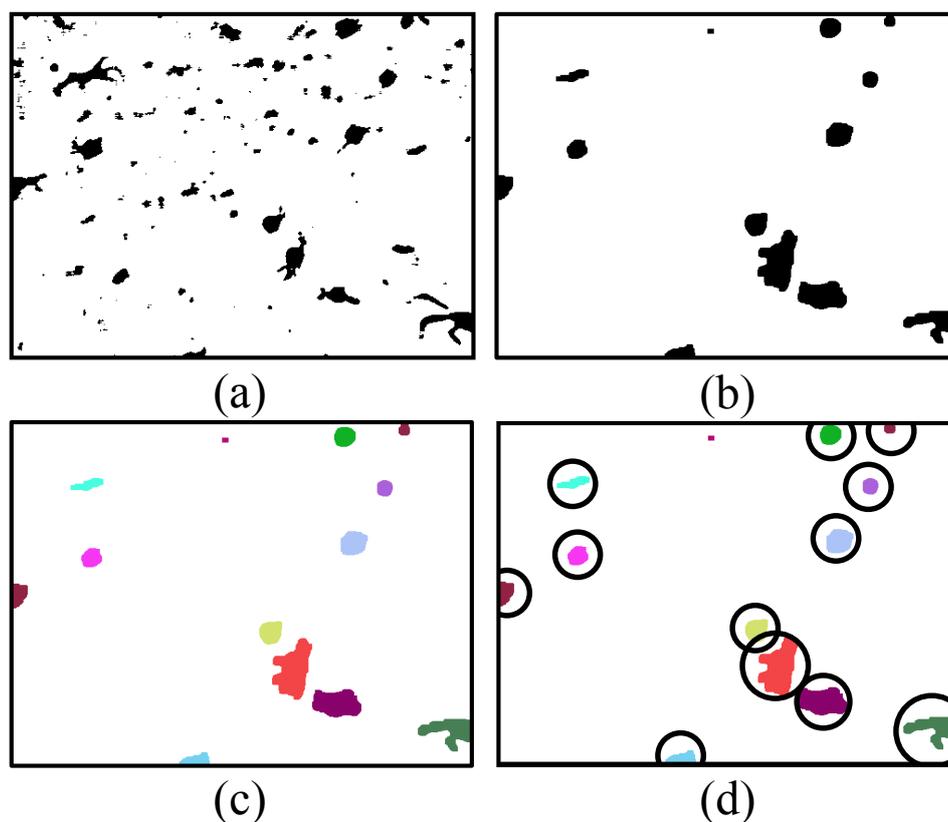


Fig.3. 3 The results by each process of image segmentation
(a): Binarization, (b): Closing, (c): Labeling and (d): Checking region size

Fig.3. 3 (a)は、Binarization により二値化された結果であり、(b)は、Closing によりノイズが排除された二値化画像である。(c)は、Labeling の結果であり、各黒の領域に番号を与えそのバン後ことに色で表現した。(d)は、Checking region size の結果であり、対象のピクセル数と比較して小さい又は大きい領域を排除する。(d)では、中心の上にある領域がピクセル数の不足により排除された。

この処理の結果で、Fig.3. 2 の Output のように各領域に分けられて、Classification of Marine Life の処理で対象化分類を行う。本処理を Fig.3. 4 に示す。

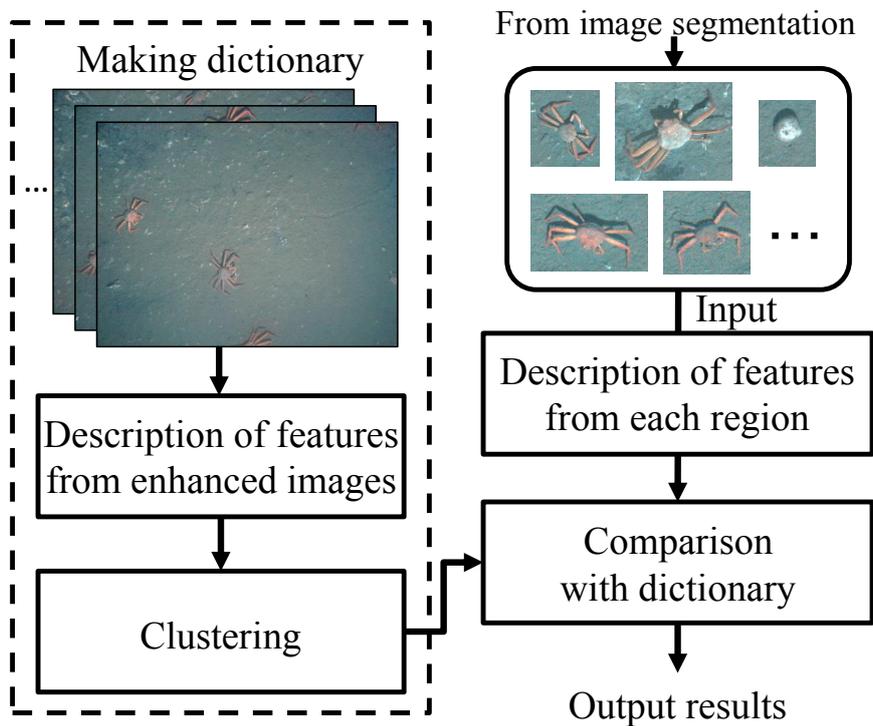


Fig.3. 4 The flow chart of classification based on BoK

Fig.3. 4 はオフラインで行う dictionary の作成とオンラインで行われる Comparison に分けられる。Dictionary はカニや海底の石などの領域から検出された特徴量をクラスタリングしたデータベースである。クラスタリングには K-means が利用されており、分けられたクラスターを visual word と呼ぶ。Comparison では、各 visual word と対象候補領域で検出された特徴量を比較することで、候補が何かを分類する。

Dictionary の作成と分類の詳細を Fig.3. 5 に示す。

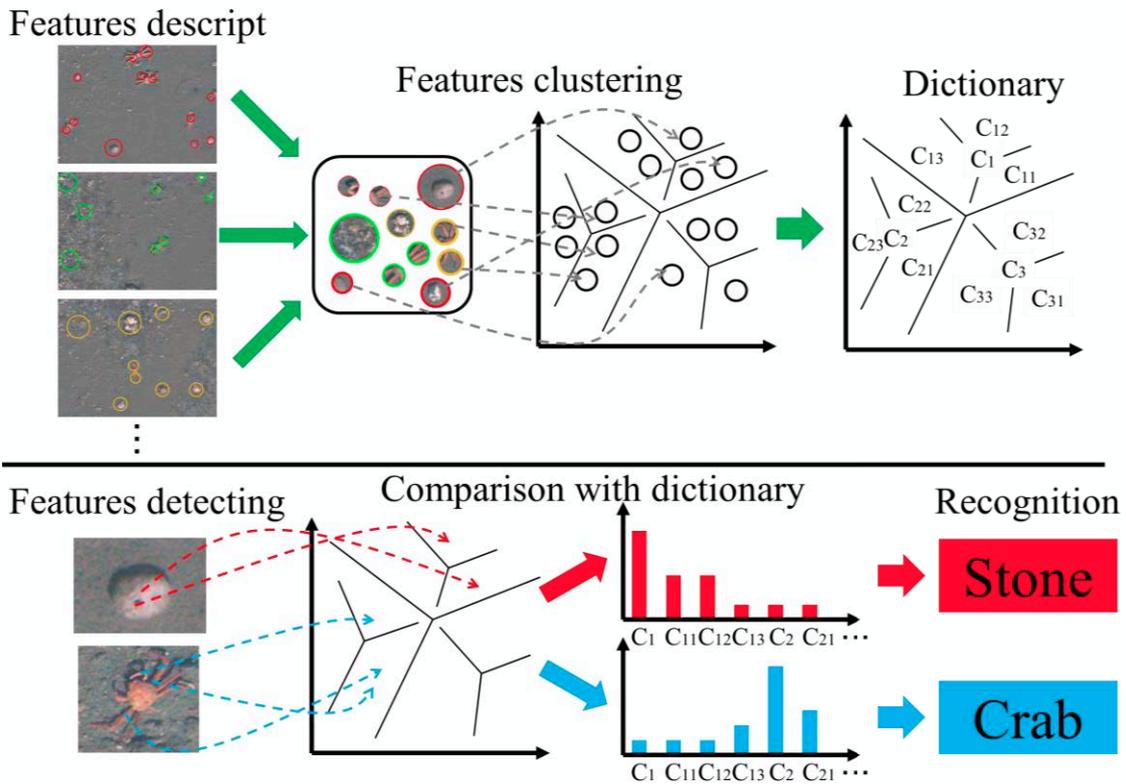


Fig.3. 5 Making dictionary and comparison in BoK

Dictionary の作成では、複数の深海画像から特徴量を検出し、K-means によるクラスタリングを行う。各クラスターは visual word として comparison で比較される。Comparison では Image segmentation の結果で得られた候補領域から特徴量を検出し、各 visual word と比較を行う。比較の結果をヒストグラムで表し、カニを情報を含めている visual word に当てはまった時にカニとして認識し、反対の場合石に認識する。本処理の結果を Fig.3. 6 に示す。



Fig.3. 6 The result images by recognition process

Fig.3. 6 は対象認識の結果画像であり、カニとして認識されたものを緑円に、石や砂利などを赤の円に表した。

本認識手法を評価するため、10 枚の画像を任意で選択し認識を行った。この結果画像を Fig.3. 7 に示す。

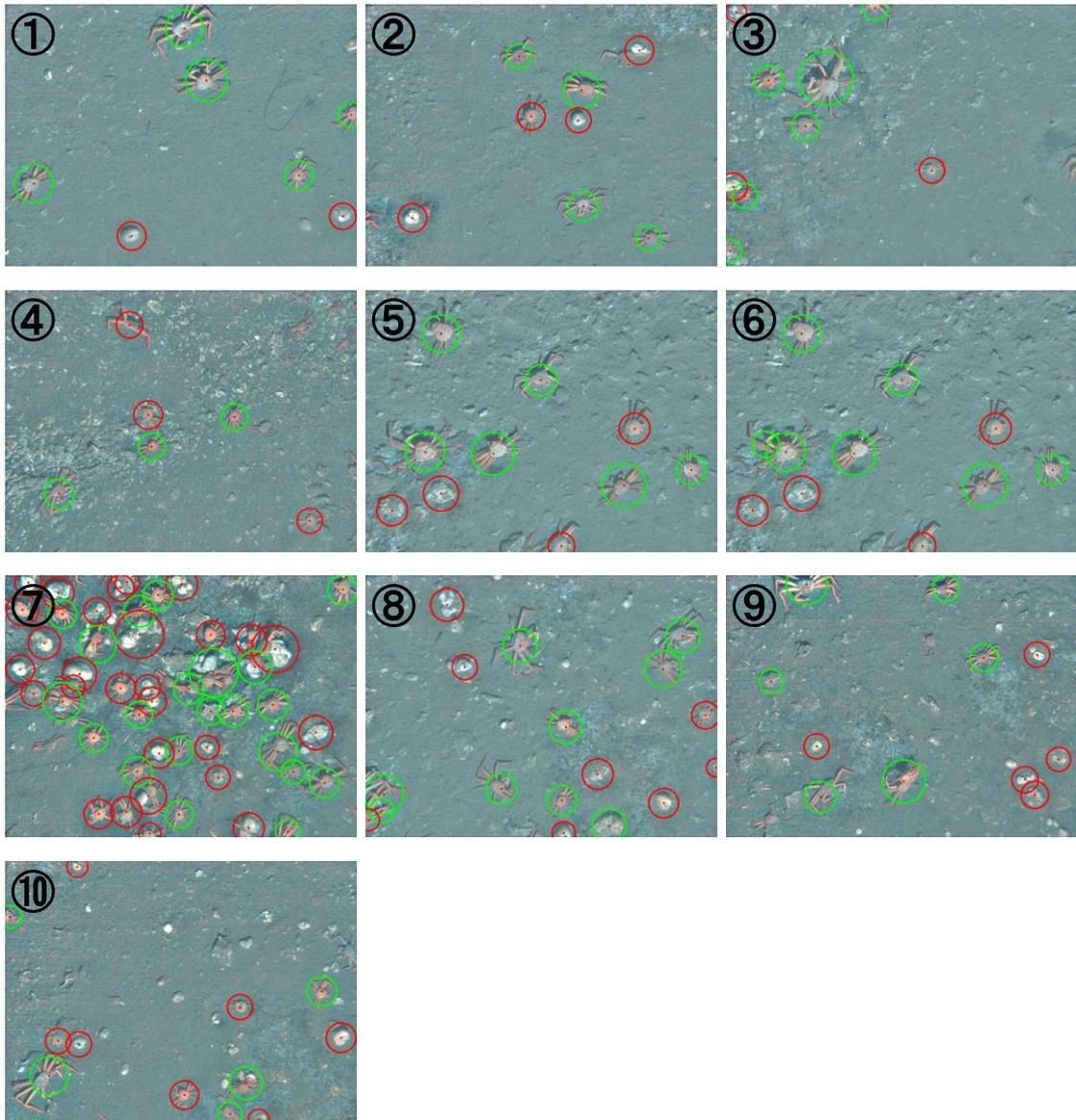


Fig.3. 7 The result images by marine life recognition

Fig.3. 7 の評価には Accuracy による評価を行う。Accuracy の式を式(3.1)に示す。

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad \dots(3.1)$$

式(3.1)では、True Positive(TP), True Negative(TN), False Positive(FP), False Negative(FN)で認識の結果を分類する。TP はカニをカニに分類しものであり、TN は石を石に分類したもの、FP は石をカニに分類したもの、FN はカニを石に分類したものである。Fig.3. 7 の評価結果を Table 3. 2 に示す。

Table 3. 2 Accuracy of recognition method

No.	TP	TN	FP	FN	Acc.
1	5	2	0	0	100%
2	4	3	0	1	88%
3	5	2	1	1	78%
4	3	0	0	3	50%
5	7	2	0	2	82%
6	11	11	0	2	92%
7	20	18	1	11	76%
8	8	5	0	3	81%
9	5	5	1	0	91%
10	5	7	0	1	92%
Total accuracy					84%

本認識手法の結果 84%の Accuracy が確認された。Accuracy の低下の原因としては、候補領域内から検出された特徴点の数の不足と、カニと石が重なっている問題が大きい原因であった（画像番号3番など）。これらの問題を解決するためには、現在分類に使用している画像(640×480)より高解像度の画像を利用することで解決できるが、演算時間の増加により AUV システムへの実装が難しくなる。本システムでは、選択された画像を調査船へ送信し、船上のオペレーターによる確認が伴うため、13%で対象ではない画像が送信されたとしても十分対象ができる。これから本システムは有効であると判断する。

3.2 注意モデルによる画像選択

注意モデルにとる画像選択に関しては、認知心理学に基づいて人間の視覚的注意を数理モデル化した Itti-Koch モデル [36]を使用する。本モデルで Koch は特徴統合理論 [38]に基づいて、単純な特徴らが人間の視覚的注意を引き、その特徴らを統合することで注意を引く値（顕著度）を得ることができると提案した。Itti は Koch が提案したモデルを数理モデルとして確立させた。本モデルの詳細を 3.3.1 に述べる。

3.2.1 Itti-Koch モデル

本モデルでは画像の Color, Intensity, Orientation の成分を 2次元平面に配置し、各結果を統合することで画像内の顕著性が高い領域と顕著度を表現する。

Color に関する式を式(3.2)に示す。

$$\begin{aligned} M_{RG} &= (r - g) / \max(r, g, b) \\ M_{BY} &= (b - \min(r, g)) / \max(r, g, b) \end{aligned} \quad \dots(3.2)$$

Color では赤と緑の差(M_{RG})と、青と黄色の差(M_{BY})を基に計算を行う。 r, g, b は画像内の赤、緑、青の空間である。Intensity に関する式を式(3.3)に示す。

$$M_I = (r, g, b) / 3 \quad \dots(3.3)$$

M_I は Intensity 成分のマップである。 M_I は画像の赤、緑、青の空間の平均により構成される。Orientation に関する式を式(3.4)に示す。

$$M_\theta = \|M_I(\sigma) * G_0(\theta)\| + \|M_I(\sigma) * G_{\pi/2}(\theta)\| \quad \dots(3.4)$$

式(3.4)では、 M_θ は角度成分からのマップであり、 G はガボールフィルタである。 G の詳細を式(3.5)に示す。

$$G_\psi(x, y, \theta) = \exp\left(-\frac{(x')^2 + \gamma^2(y')^2}{2\delta^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{y} + \psi\right) \quad \dots(3.5)$$

式(3.5)では、 γ は aspect ratio であり、 δ は standard deviation、 λ は wavelength、 ψ は phase、 (x', y') は角度により変換された座標空間である。 (x', y') を式(3.6)に示す。

$$\begin{aligned} x' &= x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \\ y' &= -x \sin(\theta) + y \cos(\theta) \end{aligned} \quad \dots(3.6)$$

各処理の結果を Fig.3. 8 に示す。

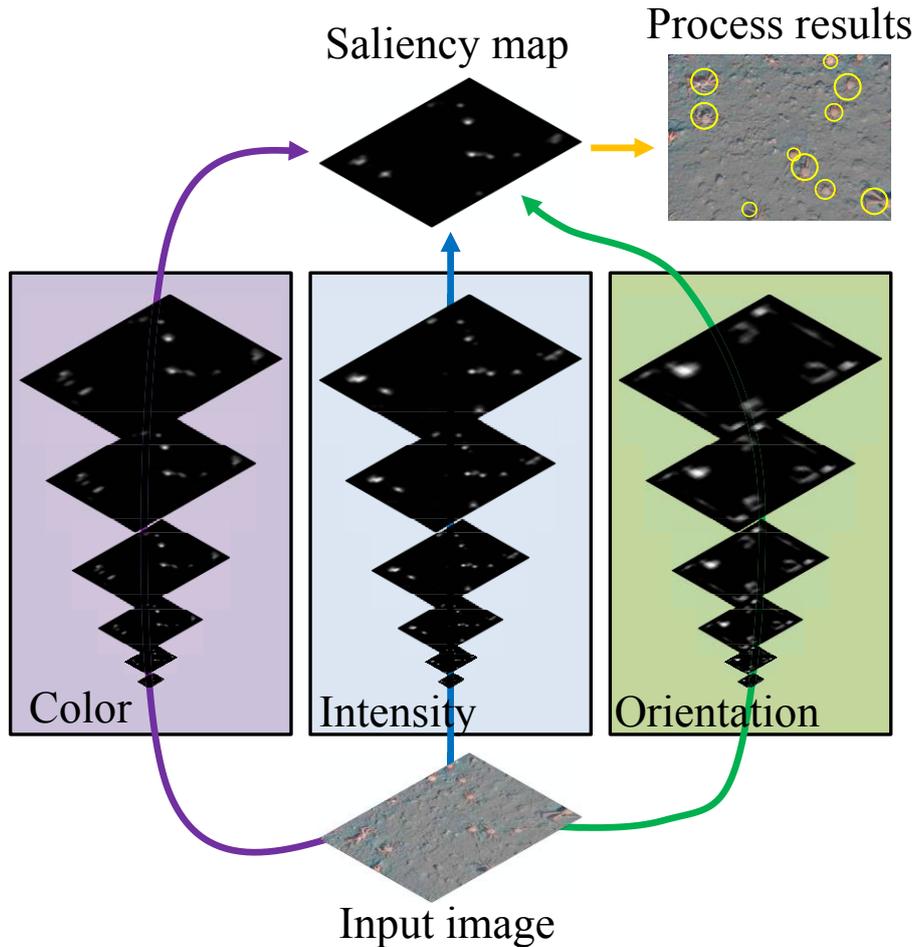


Fig.3. 8 The detail of calculation of Saliency map

$M_C(M_{RG}, M_{BY})$, M_I , M_θ を正規化し統合した結果が Result of process であり、この2次元マップ(Saliency map)が顕著度と顕著性が高い位置を表す。顕著性が高い位置が白で表されており、顕著度は色強度により表現される。本システムは、Kochの研究グループで提供している Saliency toolbox [39, 40]を用いて、

画像選択システムを作成した。本 Toolbox には、Itti は Koch のモデルを拡張させており、Saliency map を演算した後その関心領域から Top-down 的に物体を検出するアルゴリズムが含まれている [40]。

3.2.2 海底画像への適用

本モデルによる画像選択を評価するため、AUV により撮影された海底画像 10 枚へ適用した。Fig.3.9 に海底画像への適用の例を示す。

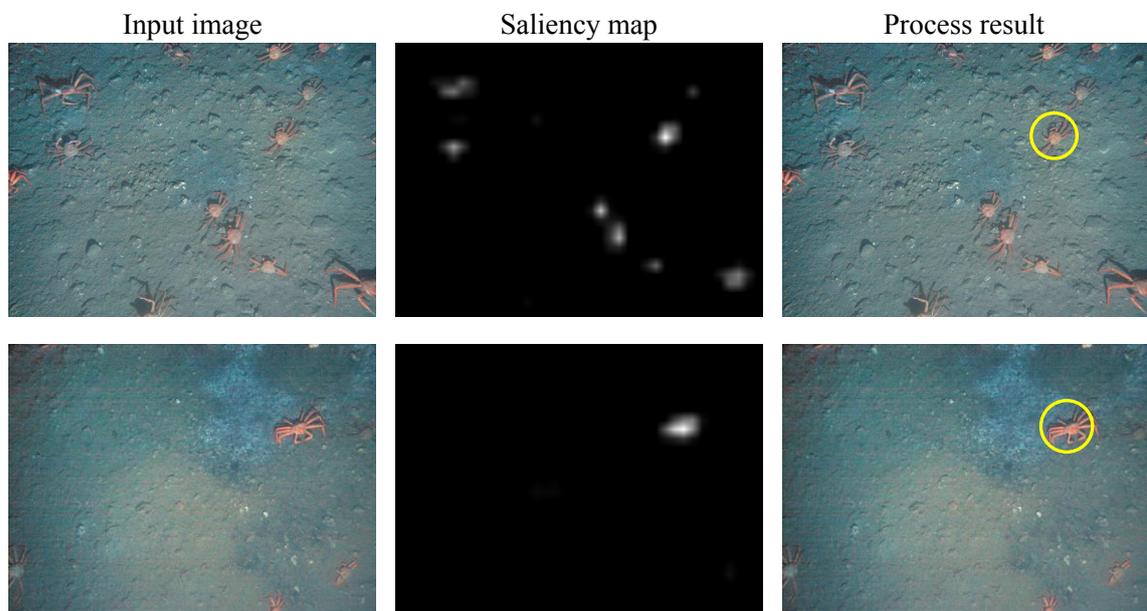


Fig.3.9 Examples of image selection by Itti-Koch model

Fig.3.9 では、入力された海底画像、Saliency map、画像内の最大顕著度を持つ位置を表す。深海画像 10 枚に適用した結果、画像内でカニが最大顕著度を持つ領域で選択された場合が 90%である。

この結果から、本手法による画像選択が有効に使用できると判断した。

3.3 考察

音響通信は 1) 超音波の伝搬速度は約 1500m/s で、電磁波の速度の約 1/200,000 である。従って情報の伝達速度が遅い。2) 音響エネルギーの吸収が大きい。特に、高い周波数では、吸収が大きいため、遠距離通信では、分解能が低い低周波音波を使用する。従って、信号の情報密度が低い。3) 海洋の周囲雑音（スラスタや他音響雑音など）の影響により、音響信号の伝達距離が低下する。の特性を持つため、AUV が撮影した全ての画像を支援船に送信することは難しい。そこで、生物などが撮影されている興味深い画像を AUV が自動で選択して送信する手法を提案した。

提案した手法は“対象認識による画像選択方法”と、人間の“注意モデルによる画像選択方法”であり、“対象認識による画像選択方法”は SIFT と BoK による特徴量に基づいた対象認識を用いた。この結果、カニ認識に対する正答率が 84%であった。また、“注意モデルによる画像選択方法”では、画像内の最大顕著度を持つ領域がカニである場合が 90%であった。

この結果から、両手法共に画像の選択に有効に活用できると判断できる。

第4章

音響通信による 画像送信

4. 水中画像の圧縮と復元

音響通信で使用する超音波の伝搬速度は約 1500m/s で、電磁波の速度の約 1/200000 である。また、音響エネルギーは吸収率が大きく、特に高い周波数での吸収率が大きいいため、遠距離通信には低周波の音波を使用する。このため、情報の密度が低い。海洋の周囲雑音（スラスタ雑音など）の影響を受け、通信距離が低下する。即ち、音響通信は“低速”、“情報密度が低い”、“データ損失”という問題がある。

このため、“低速かつ情報密度が低い”問題を解撤するため、AUV による画像選択 (3 章:撮影した画像が送信するほど価値がある画像かどうかを判断する。ex) 海底の砂だけが撮影された画像は送らずに、生物などが撮影された画像を送信する。) を行い、更に画像を圧縮し送信する。

水中での音響通信成功率は、音響モデムの位置関係が重要である [2] [14]。このため近年では、音響モデム搭載した AUV を停止させデータを通信する手法 [41]や USV(Unmanned Surface Vehicle)を用いて AUV の位置を観測し自動に追従しながら音響モデム間の垂直な位置を維持する手法 [42]などが研究されている。

AUV を停止させデータを通信する手法に関しては、連続画像を Wavelet 変換による圧縮し送信する実験を行った [41]。実験の方法と結果を Fig.4. 1 に示す。

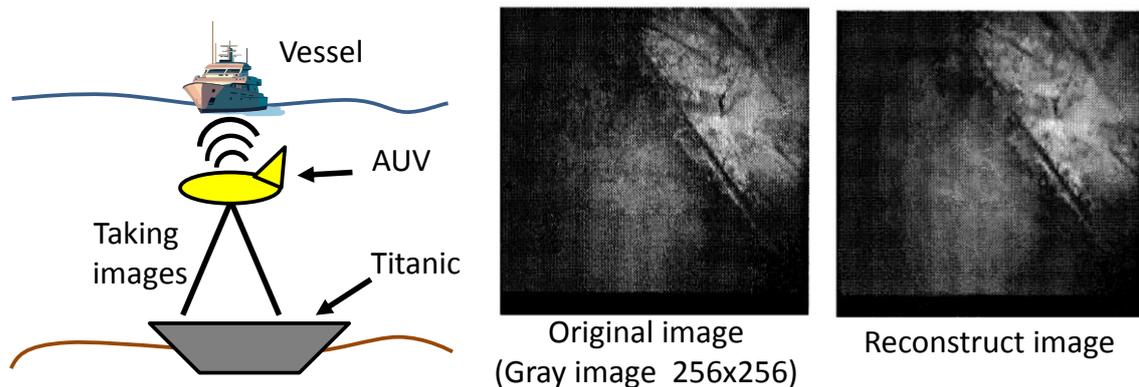


Fig.4. 1 The overview of experiment and resultant image in Hoag's paper [41]

実験では、AUV に音響モデムを搭載し、沈没船 Titanic を連続で撮影し送信する実験を行った。調査船に受信された画像をピーク信号対雑音比(PSNR)で評価を行い、30.2db から 31.1db の結果を見せた。(PSNR - 25db 以下 : poor、35db 以上 excellent)

USV(Unmanned Surface Vehicle)を用いる手法に関しては、移動中の AUV の位置を USV が観測しながら垂直な位置を保ち、SSS (Side Scan Sonar), と AIS (Acoustic Imaging Sonar) データを送信する手法が提案されている [42]。本手法の実験結果、SSS データは 72 回送信 72 回受信 (11 回の再送信を含む) で 100%の通信成功率が確認されており、AIS データは 348 回送信 339 回受信 (45 回の再送信を含む) で 97.4%の通信成功率が確認された。

本研究では AUV が常に移動しながら画像データの送信するシステムを提案している。提案している戦略の時に行われる通信の様子を Fig.4. 2 に示す。

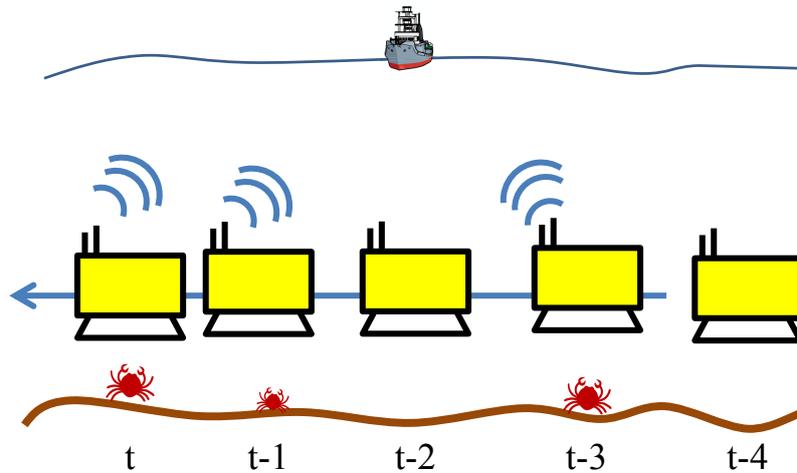


Fig.4. 2 The acoustic communication during exploration

本研究での Fig.4. 2 のように AUV が移動しながらデータを送信しているため、AUV と支援船との垂直な位置関係を保つのは容易ではない。このため、通信成功率はより低くなり、欠損データを再送信する場合、通信が終わらない可能性もある。そこで、本研究では一方通信を行う。

一方通信では、双方通信と比較して信頼性が低く、通信の欠損、データ順番の逆転などが起こる。このため Wavelet 変換を用いた圧縮では、データ損失が発生した場合、画像の全領域の質（画像の低周波成分と高周波成分）が大きく下がる。JPEG [43]は、高い圧縮率をもっているが、データを周波数空間へ変換させるため、通信中のデータの損失が起こった場合、画像として復元することは容易ではない。また、他の圧縮フォーマットに関しても、データの Header 部の損失が起きた場合、復元が容易ではない。

そこで本研究では、データ損失が発生しても画像として復元できるかつデータ損失による影響が得損失したデータ部だけに影響を与える圧縮と復元手法を提案する。

4.1 画像圧縮と復元方法

提案する画像圧縮と復元手法では、色量子化に基づいた色圧縮を行う。カラー画像では各 R, G, B の空間を持っており、その 3 つの空間を用いてカラー画像 (Color image: 24bit; Red plane: 8bit, Green plane: 8bit, Blue plane: 8bit) で表現される。単純な色圧縮では、カラー画像の分解能(bit 数)を調整することでデータの量を減らす。線形的に分解した 8bit 又は 4bit のカラー画像を作成することは可能であるが、結果画像(8bit 又は 4bit)は元の画像(24bit)とは大きく異なる画像となる。Bit の変化によるカラー変化を Fig.4. 3 に示す。



Fig.4. 3 The change of color bit (24bit -> 4bit)

Fig.4. 3 では、24bit の色相を 4bit の色相で圧縮した画像である。このような色の量子化による圧縮の様子を Fig.4. 4 に示す。

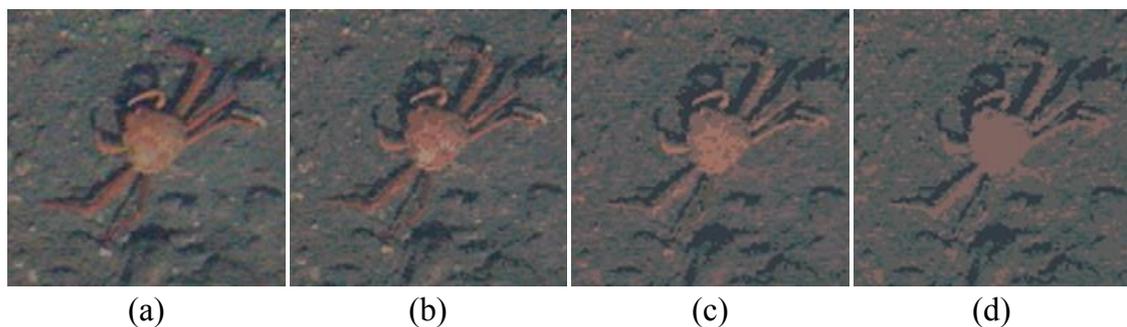


Fig.4. 4 Change of color depth from an image

(a): 24-bit color, (b): 4-bit color, (c): 3-bit color, (d): 2-bit color

に最も近いカラーで構成されているカラーパレットを選択し Compression data に圧縮を行う。カラーパレットを選択に関する数式を式(4.1)に示す。

$$e(l) = \left\| \sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n \sum_{k=1}^b I(x, y) - p(k, l) \right\| \quad \dots(4.1)$$

式(4.1)では、24bit カラー画像の各ピクセルの RGB 値と、カラーパレットを構成している各カラーとの 3 次元空間での距離を Euclidean distance により計算を行い、最も短い距離を持つカラーパレットを選択する。式(4.1)の I は入力画像であり(x,y)は画像内座標である。p はカラーパレットであり、k はカラーパレット内のカラー番号であり、l はカラーパレットの番号である。e は、画像内ピクセルのカラーとカラーパレットの各カラーとの距離である。

24bit カラーデータからカラーパレットにより 2bit カラーで圧縮された Compression data は、Header 部にカラーパレット番号を持ち送信される。データの送信は一つの packets ごとに行われており、音響通信中にデータの損失が発生した場合は、一つの packets 全部が損失される。Received data は、データ損失を含めているが、全 packets の Header 部にカラーパレット番号が服慣れているため、を用いて画像を復元できる。損失された領域は黒いラインで表示される(Reconstruction image)。Reconstruction image 画像は元の 24bit 画像とは少し異なるが、非常に近い色で構成される。

本提案手法では、水中画像でよく利用されるカラーでカラーパレットの構成する必要がある。このために、カラー量子化の一つである Median cut [45]による手法を用いた。そのアルゴリズムを Fig.4. 6 に示す。

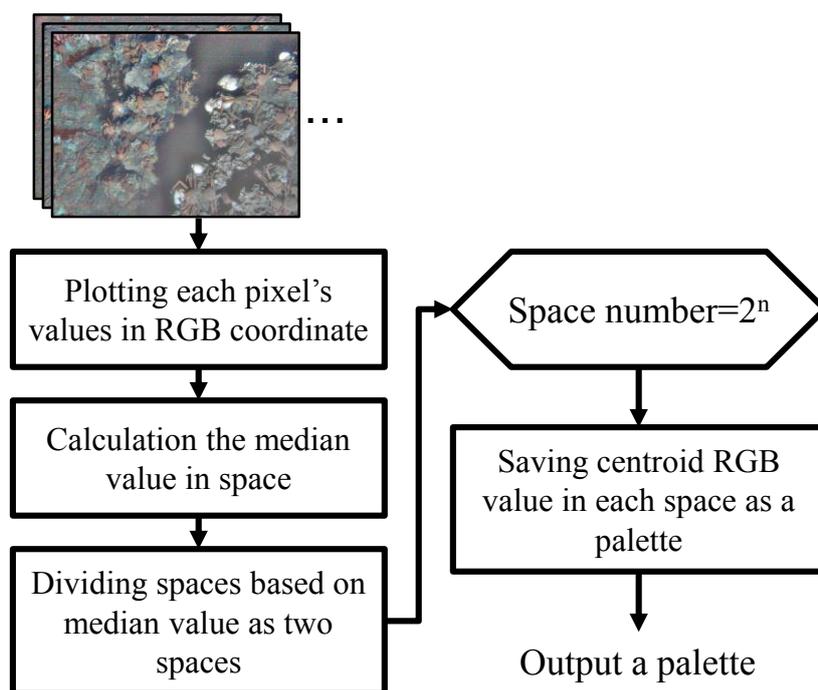


Fig.4. 6 The used median-cut algorithm

Fig.4. 6 では複数の入力画像らの各ピクセルの RGB 値を RGB の 3 次元座標空間上で表す。RGB 空間での各ピクセルの最大値と最小値を基に立方体の空間を作成、その立方体の一番長い平面の中央値を基に分ける。分けられた空間でさらに立方体を作成し同じ処理をカラーパレットの bit 数分に行う。その処理の流れを Fig.4. 7 に示す。

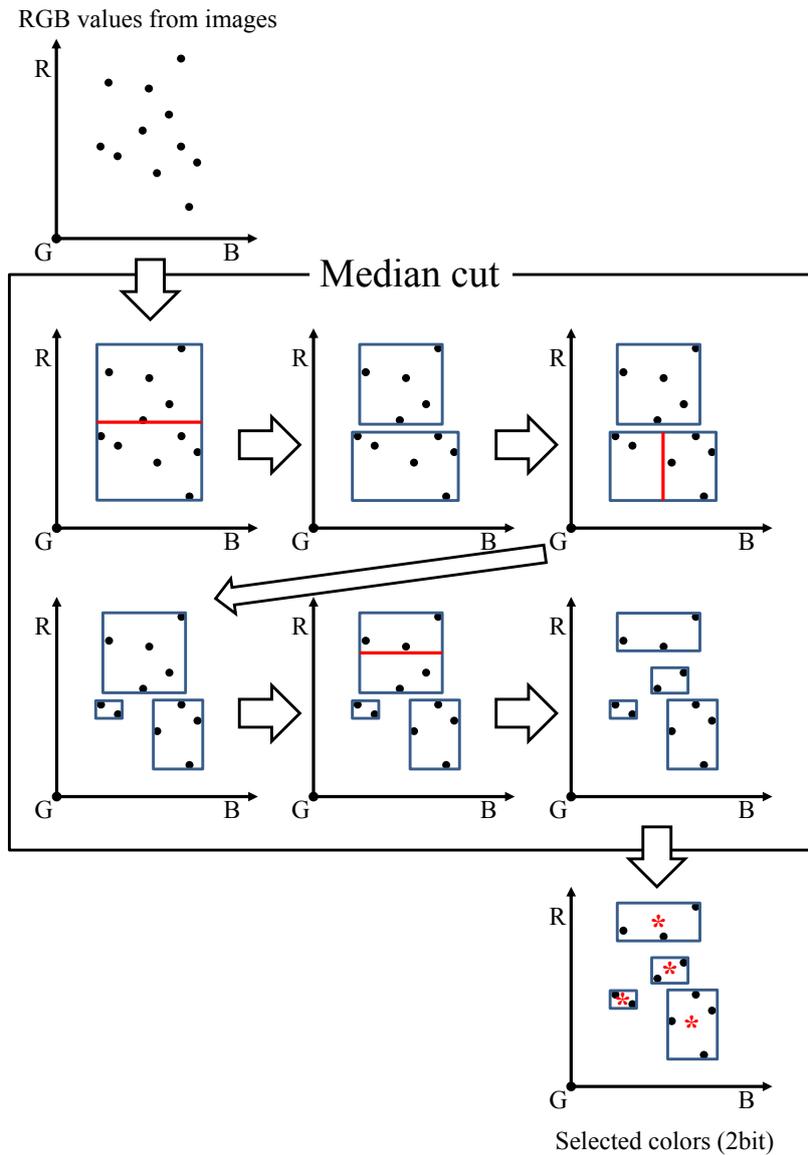


Fig.4. 7 The processed results of Median-cut algorithm

Fig.4. 7 の RGB values from images は、入力画像らのピクセルたちの値である。Median-cut の中のクラブは R, G, B 空間を表しており、各ピクセルの最大値と最小値を基準に立方体を作成、立方体の中央値を基準に分ける。これらの処理を目標 bit 数まで連続で行い（ここでは 2bit）、目標 bit 数になった場合、各立方体の中央の値がカラーパレットのカラーとなる。

4.2 圧縮画像の類似性評価

カラーパレットにより作成された画像を評価するため、Structural SIMilarity (SSIM) [46]を用いた評価を行う。SSIM は、同じシン(Scene)の二つの画像の構造的類似性を評価する手法であり、評価では、輝度(luminance; l)、対比(contrast; c)、構造(structure; s)を用いて評価を行う。各要素評価の数式を式(4.2)から(4.4)に示す。

$$l(I_1, I_2) = \frac{2\mu_{I_1}\mu_{I_2} + v_1}{\mu_{I_1}^2 + \mu_{I_2}^2 + v_1} \quad \dots(4.2)$$

式(4.2)の I_1, I_2 は比較する画像であり、 μ_{I_1} は I_1 の平均であり、 μ_{I_2} は I_2 の平均、 v は SSIM 変数である。

$$c(I_1, I_2) = \frac{2\sigma_{I_1}\sigma_{I_2} + v_2}{\sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2 + v_2} \quad \dots(4.3)$$

式(4.3)の σ_{I_1} は I_1 の標準偏差であり、 σ_{I_2} は I_2 の標準偏差である。

$$s(I_1, I_2) = \frac{\sigma_{I_1 I_2} + v_3}{\sigma_{I_1}\sigma_{I_2} + v_3} \quad \dots(4.4)$$

式(4.4)の $\sigma_{I_1 I_2}$ は x, y の共分散である。SSIM 変数(c_1, c_2, c_3)の式を式(4.5)に示す。

$$v_1 = (k_1 g)^2, v_2 = (k_2 g)^2, v_3 = v_2 / 2 \quad \dots(4.5)$$

式(4.4)の g は dynamic range of the pixel-values であり、 k_1 は 0.01、 k_2 は 0.03 である(default)。

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)^u \cdot c(x, y)^v \cdot s(x, y)^w] \quad \dots(4.6)$$

式(4.6)で、 u, v, w は重みづけ変数であり、ここでは 1 を使用する。

SSIM による評価は、AUV により撮影された深海を補正した画像と 4bit カラー

ーに圧縮した画像を比較する。カラーパレットは、比較対象外画像（同じ海域で撮影された画像 10 枚）から一つのカラーパレットを作成する。使用したカラーパレットと補正画像、圧縮画像の例を Fig.4. 8 に示す。

Used color palette(4bit)



Enhanced images



Compressed images



Fig.4. 8 A color palette from 10 enhanced deep sea floor images and a sample image by compression method (4bit)

Fig.4. 8 は、画像のカラー圧縮のため使用したカラーパレット、補正画像とカラーパレットを用いて 4bit に圧縮した画像である。圧縮画像は補正と比較して少し異なる色で構成されているが、近い色で構成されているため、撮影された対象を船上のオペレーターが確認するには、十分な情報を含んでいる。

Fig.4. 8 を用いて圧縮した 10 枚の画像を Fig.4. 9 に示す。

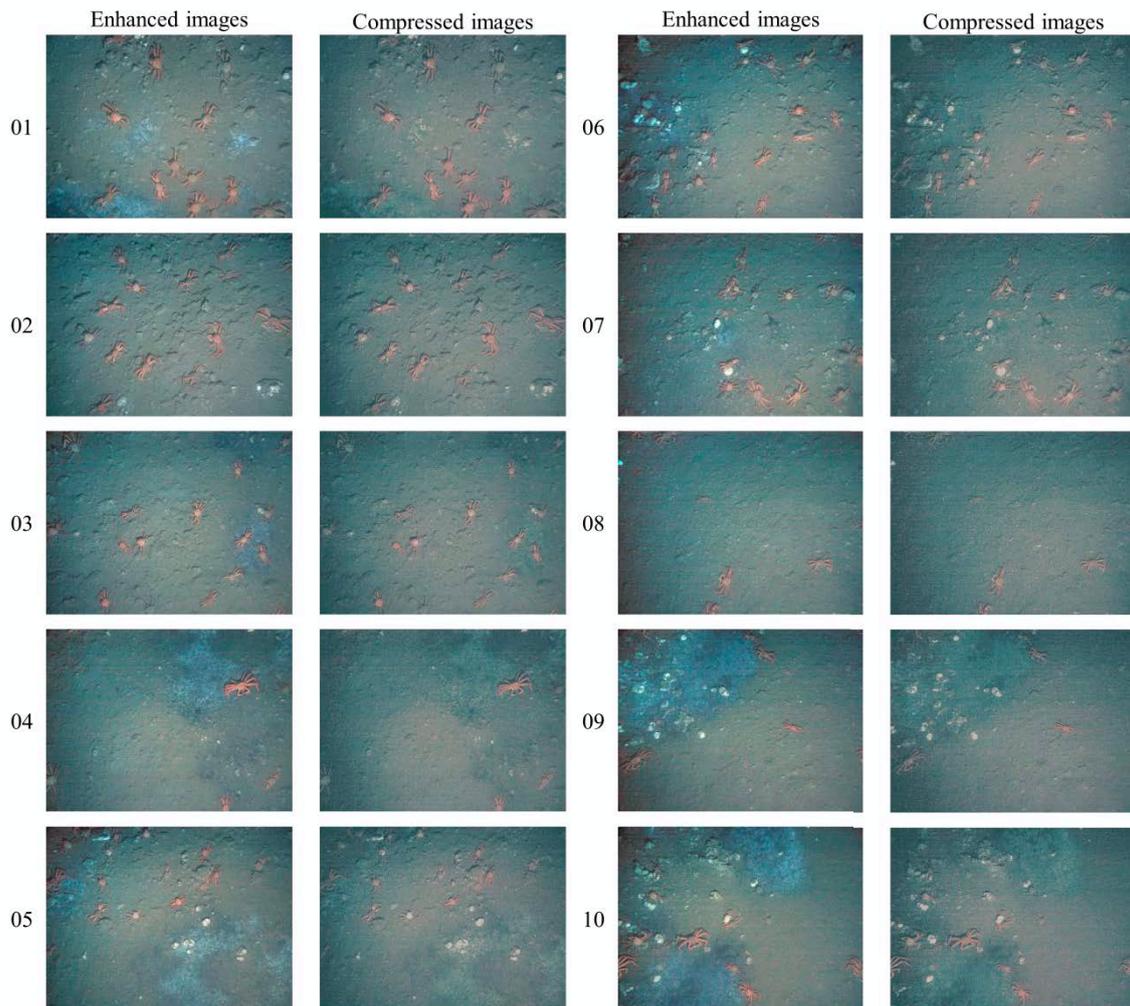


Fig.4. 9 A comparison between Enhanced images and compressed images

Fig.4. 9 の各圧縮画像は Fig.4. 8 と同様に少し違うカラーで構成されている。
補正画像と圧縮画像の SSIM による構造的類似性を Table 4. 1 に示す。

**Table 4. 1 The SSIM values from difference
between enhanced images and compression images**

No.	01	02	03	04	05
SSIM	0.8878	0.9025	0.8942	0.8909	0.8784
No.	06	07	08	09	10
SSIM	0.8609	0.8781	0.8861	0.8755	0.8805

Table 4. 1 の結果、10 枚画像の平均 SSIM は 0.8835 であった。SSIM が 0.9 以上である場合、人間は二つの画像の差を確認しにくい [46]。このため、0.88 は以上に類似性が高い画像である。詳細な評価のために、人間の注意モデルである Saliency map [36] を圧縮画像と補正画像に適用し、画像内の注意位位置の評価を行う。その結果を Fig.4. 10 に示す。

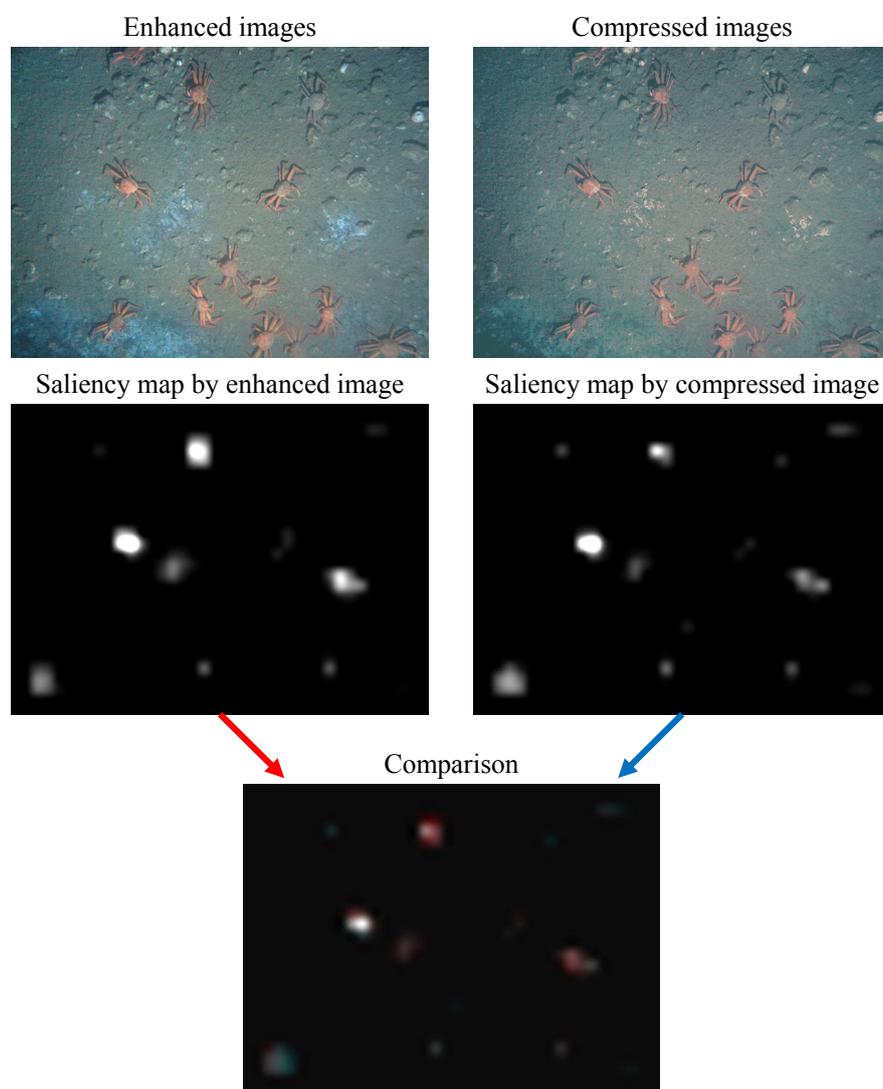


Fig.4. 10 The Comparison between Saliency map by enhanced image and Saliency map by compressed image

Fig.4. 10 では、補正画像と圧縮画像の Saliency map を求め、補正画像の Saliency map を赤に、圧縮画像の Saliency map を青に、両方重なる場合白に表した。結果、色の圧縮により、顕著度の位置と強度が少し異なる場合もあるが、大きく異なる領域は発見できなかった。

各 Saliency map の最大顕著度と位置を Table 4. 2 に示す。

Table 4. 2 The Maximum Saliency and position in images

No.	image	Maximum Saliency	Position		No.	image	Maximum Saliency	Position	
1	Enhanced	2.38	185	216	6	Enhanced	2.15	471	205
	Compressed	2.38	186	224		Compressed	2.18	336	42
2	Enhanced	2.24	230	135	7	Enhanced	2.30	276	358
	Compressed	2.27	229	138		Compressed	2.36	280	359
3	Enhanced	2.38	249	292	8	Enhanced	2.48	287	395
	Compressed	2.40	251	291		Compressed	2.44	279	387
4	Enhanced	2.60	507	149	9	Enhanced	2.27	220	284
	Compressed	2.60	507	149		Compressed	2.36	210	282
5	Enhanced	2.27	428	136	10	Enhanced	2.30	282	242
	Compressed	2.27	226	240		Compressed	2.33	286	247

Table 4. 2 の No. は Fig.4. 9 の画像の番号である。最大顕著度の位置が変わった画像は 5 番と 6 番画像であり、変わった位置は 2 番目の顕著度を持つ位置である。本評価の結果、圧縮画像で最大顕著度の位置は 80%一致している。

4. 3 AUV を用いた画像圧縮と送信実験

本システムを実海域で運用する前段階として、水槽環境での音響通信実験を行った。搭載したシステムは、画像の補正及び、注意モデルによる画像選択、画像の圧縮を AUV に搭載した。実験環境の様子を Fig.4. 11 に示す。

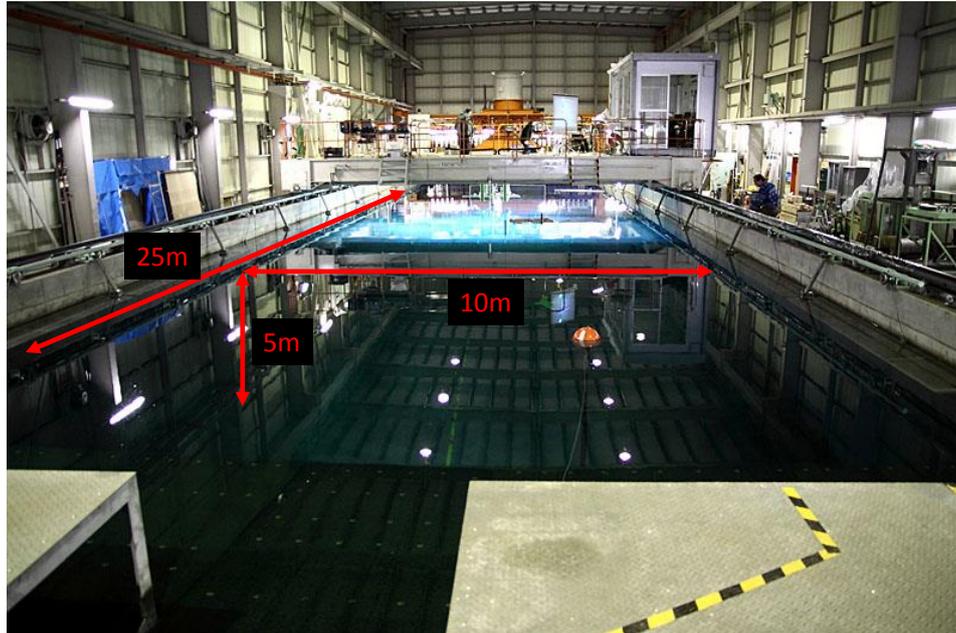


Fig.4. 11 A pool environment for experiment of acoustic transmission using AUV

Fig.4. 11 は、東京大学・生産技術研究所・千葉実験所 [47]の様子である。本水槽は、長さ 50m(底がセメントの領域 : 25m)、幅 10m、深さ 5m である。本実験に使用した AUV: TUNA-SAND2 の外見と装備の配置を Fig.4. 12 に示す。

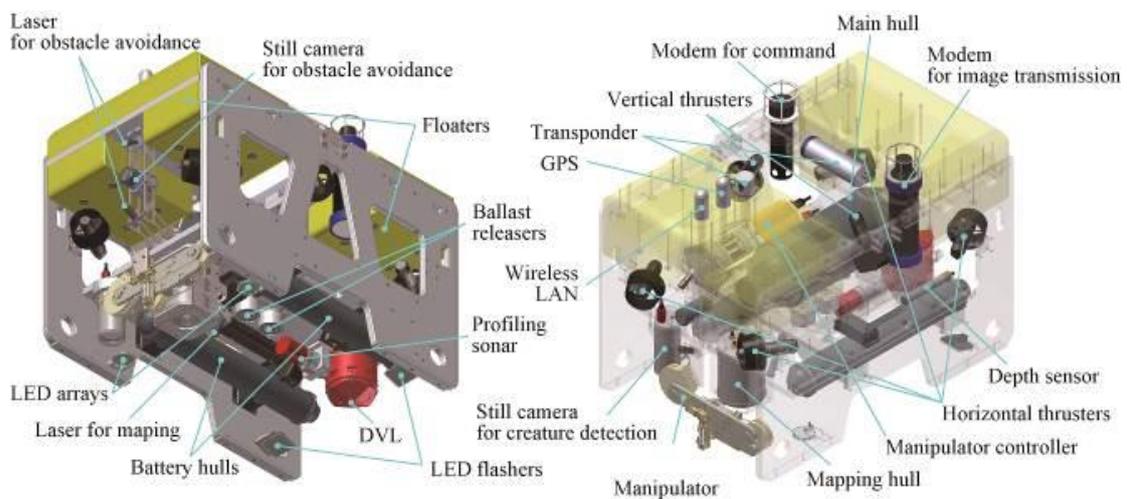


Fig.4. 12 Payloads and sensors arrangement [48]

Fig.4. 12 の AUV: TUNA-SAND2 は AUV による深海底生物サンプリングを目的に開発された AUV であり、サンプリングのためのマニピュレーターと圧縮画像送信のための音響モデム、命令受信のための音響モデムを搭載している。AUV の詳細を Table 4. 3 に示す。

Table 4. 3 Specification of AUV Tuna-Sand 2 [48]

Category	Value
Dimension	1.4m x 1.2m 1.3m
Weight	380 kg
Max. speed	1.2 kt
Max. depth	2,000 m
Duration	8.0 h
Actuators	Horizontal thruster x 4 Vertical thruster x 2 Ballast releaser x 2, Manipulator x 1
Batteries	Li-Ion 5,000Wh
Communication	Wi-Fi, Acoustic modem for command, Acoustic modem for image transition
Sensors	INS, DVL, Depth sensor, USBL positioning device
Instrumentations	Obstacle detection device, 3D mapping device, Profiling sonar

また、画像送信と受信に使用した音響モデムの様子と詳細を Fig.4. 13 と Table 4. 4 に示す。

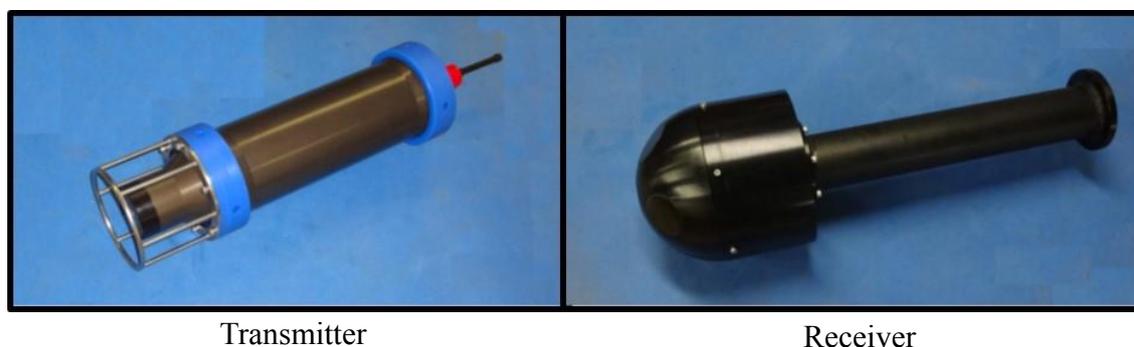


Fig.4. 13 The transmitter and receiver for image transmission

Fig.4. 13 の右の送波機と AUV に搭載し、受波機を調査船に搭載する。送波機と受波機の詳細を Table 4. 4 に示す。

Table 4. 4 The Specification of acoustic transmitter and receiver for image transmission

送波機仕様		受波機仕様	
筐体材質	アルミ合金	筐体材質	アルミ合金
構造	一体型	構造	一体型
送波指向性	±35 度	受波器	構造: 5素子 立体配置一体型アレイ 素子指向性: ±35 度以上 (1 素子単体) カバーエリア: ±75 度以上 (5素子)
送波レベル	約185dB(0dB = 1μ Pa at 1m)	受信信号について	5 素子のうち1Ch を選択して受信
電源	DC +24V、約50W	電源	DC +24V、約5W
寸法	140φ × 470mm	寸法	190φ × 590mm
重量	空中 約8kg、水中 3kg	重量	空中約8kg、水中 3kg
動作温度	0~30°C	動作温度	0~30°C
保存温度	-10~+45°C	保存温度	-10~+45°C
送波部最大使用深度	2000m	最大使用深度	100m
接続コネクタタイプ	DBH13M Cat5e Pigtail Subconn 製	接続コネクタタイプ	DBH13M Cat5e Pigtail Subconn 製

送波機のデータ送信速度は 16kbps である。AUV: TUNA-SAND2 を用いた実験の様子を Fig.4. 14 に示す。

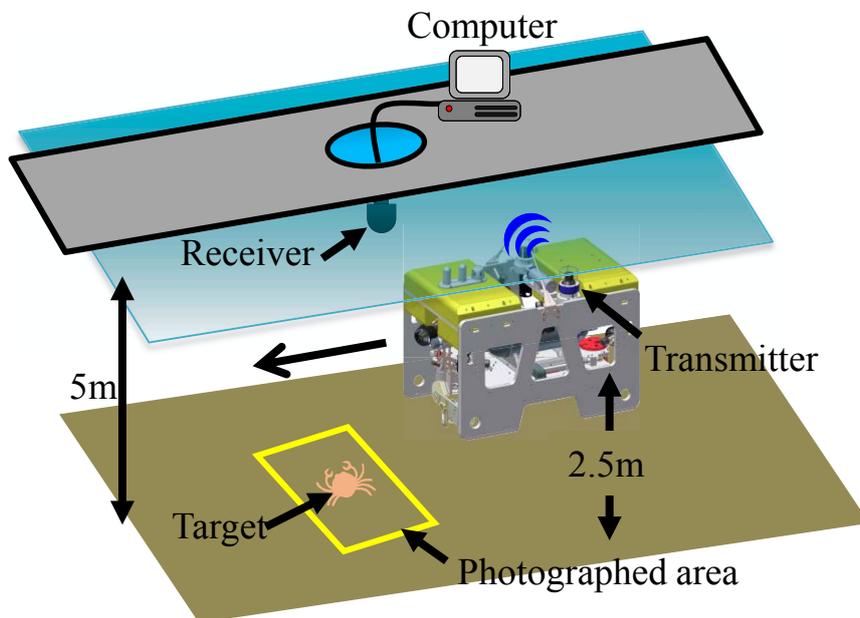


Fig.4. 14 The experimental setup for image transmission

実験では、水槽底に模型カニ（オレンジ色）を配置して、AUV の観測経路をカニの上を通るように設定する。本模型は、深海の熱水地域に生息しているユノハナガニ [49]の形であり、採集したサンプルのデータから 3D プリンターで製作した。

カニの上の水面に受波機を設置し、AUV が移動しながら画像を撮影し、送信するデータを受信する。本実験の結果を Fig.4. 15 に示す。

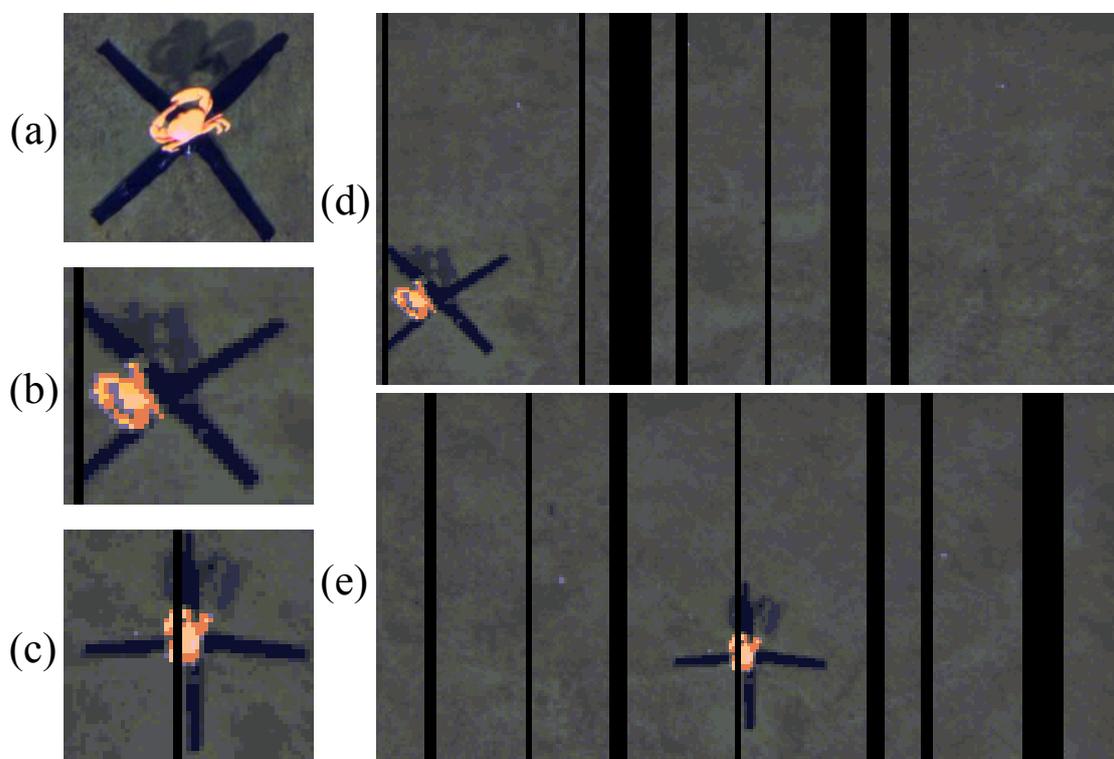


Fig.4. 15 The experimental results

- (a): The crab model image by AUV,**
- (b), (c): The area images of crab model in reconstructed image by proposed method,**
- (d), (e): The reconstructed images by proposed method**

Fig.4. 15 の(a)は AUV により撮影された画像であり、(b)と(c)は、復元画像である(d)と(e)のカニの領域の画像である。(b)と(c)では、カニの形と色両方識別可能であることが確認できた。本実験での音響通信の成功率に関しては、6 枚の画像

を送信し評価を行った。その結果を Table 4. 5 に示す。

Table 4. 5 The detail of data transmission

Image Number	Data transmission	
	<i>Success</i>	<i>Failure</i>
1	99	26
2	100	25
3	102	23
4	111	14
5	99	26
6	106	19

Table 4. 5 では 6 枚の画像送信の結果であり、送信パケットは 750 パケットの送信を行った。その結果として 72%の送信成功率が確認された。

4. 4 考察

本章では、水中環境での一方通信の際に起こりうるデータ欠損に対する圧縮手法を提案し AUV に搭載と水槽実験を行った。

提案した圧縮手法に関しては、データ欠損が発生する場合でも、画像として復元可能かつ画像詳細の確認できる手法を提案した。本圧縮手法では、画像の色の解像度を圧縮する。画像データの色は、計算機上 24bits で表現されるが、24bits の色すべてが利用される場合はなくその一部の色のみが利用される。そこで、提案した手法では、水中画像でよく利用されるカラーで構成された 4bits のカラーパレットを複数用意し撮影された画像と一番近い色のカラーパレットを選択し 24bits から 4bits に圧縮する。AUV に搭載し水槽実験を行った結果、通信成功率は 72%であり、約 10 秒で一枚の画像が送信された。また、送信された画像から対象の認識が可能であった。

第5章

実海域での 画像送信実験

5. 実海域での画像送信実験

本稿で提案した画像送信手法を AUV に搭載し実海域での調査を行った。実海域調査は、2016 年 2 月 22 日から 2 月 26 日まで静岡駿河湾で、2016 年 5 月 29 日から 6 月 5 日まで北海道のオホーツク海で、2016 年 7 月 10 日から 7 月 22 日まで沖縄瀬底島海岸サンゴ生息地で行われた。本章では、その実験らの詳細と結果に関して報告を行う。

5.1 静岡駿河湾での実験

本実験は、2016 年 2 月 22 日から 2 月 26 日まで、静岡沼津市周辺駿河湾で行われた。本実験では、生物採取を目的に製作された Sampling-AUV: TUNA-SAND2 の調査経路追従性能の評価と音響画像送信性能の評価を目的にする。

実験が行われた場所を Fig.5. 1 に示す。



Fig.5. 1 The experiment point

本実験は、Fig.5. 1 の赤丸の領域内（駿河湾）で行われており、深度約 30m で行われた。実験のためには AUV: TUNA-SAND2 と AUV を運用するための支援船と AUV の運搬、導入、揚水のための台船が利用された。実験で利用した支援船の様子を Fig.5. 2 に示す。



Fig.5. 2 The support ship Tauchi-maru
(<http://www.seatec.jp/setsubi/shiensen.html>)

支援船田内丸は、長さ 16.5m、幅:3.6m、最大速度 24kt、定員数 20 人の支援船であり、本船には、潜航中の AUV の位置を把握するための GAPS(iXblue 社)、画像データ受信のための高速音響モデム(Fig.4. 13)、支援船の位置確認のための GPS、AUV に命令を送るための音響モデムを搭載して実験を行った。

台船に関しては、船上のクレーンによる導入と揚水を行った。実験に利用した台船を Fig.5. 3 に示す。

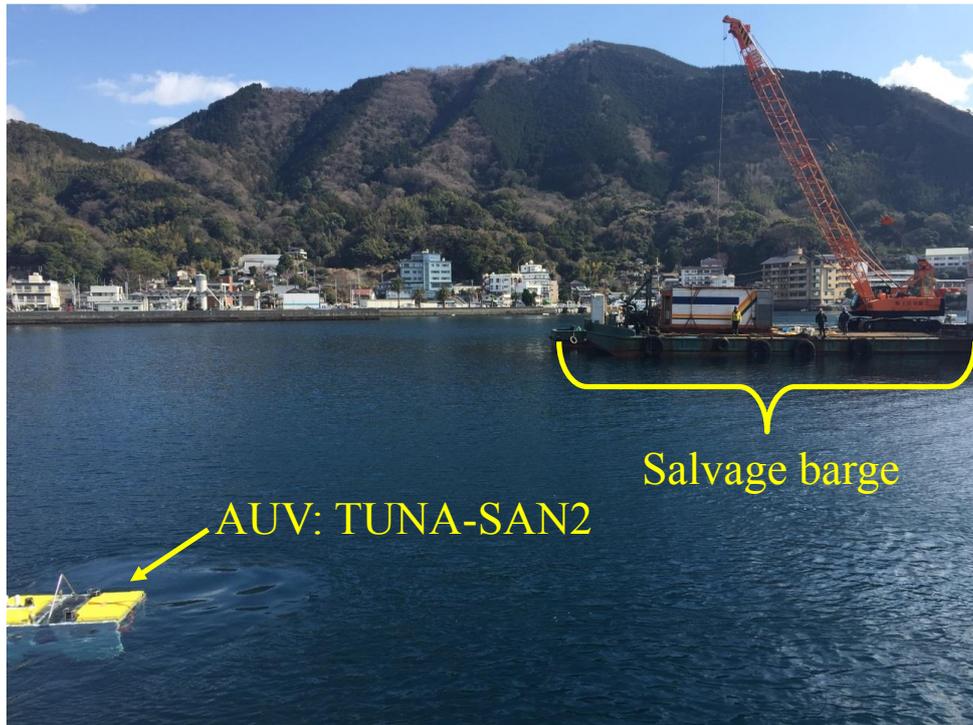


Fig.5. 3 The scene of salvage barge and AUV

Fig.5. 3 では、AUV と台船の様子が確認できる。使用した台船（第 18 浜丸）は、長さ 25.9m、幅 10.2m、深さ 1.8m、吃水：0.8m、トン数 300t 積(自重 200t)であり、搭載されているクレーンは 35t である。作業可能エリアは約 16.9m×10.0m である。

本台船と支援船による実験の詳細を Fig.5. 4 に示す。

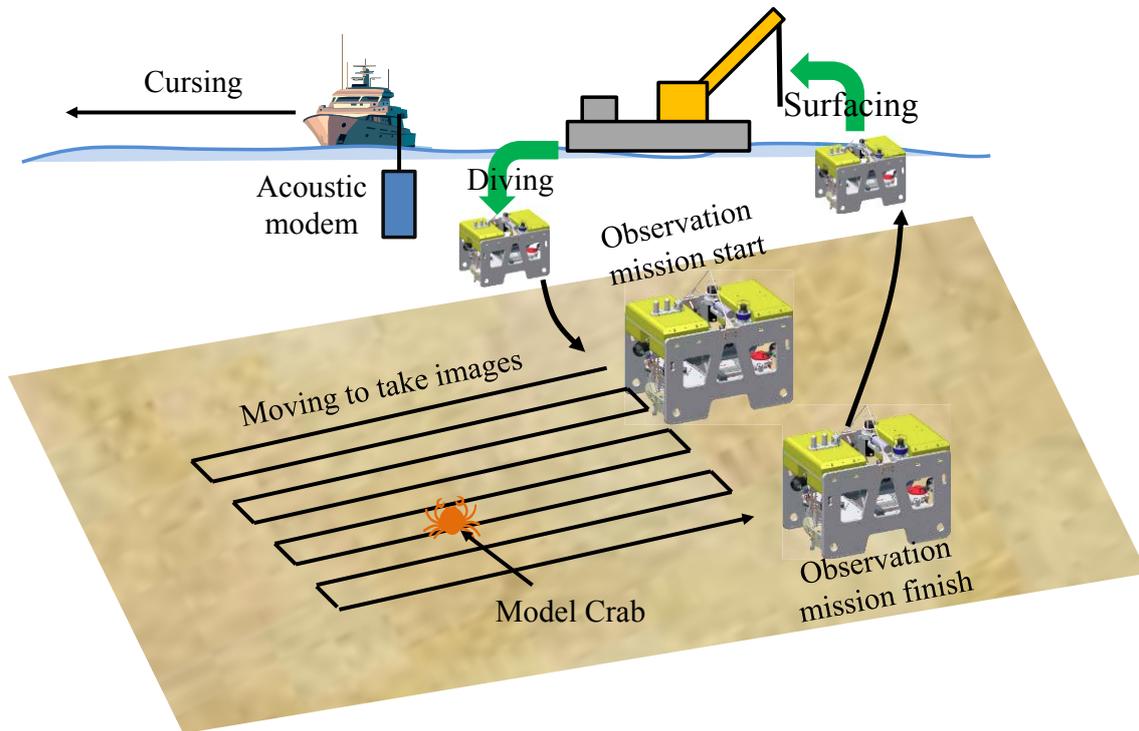


Fig.5. 4 The overview of acoustic transmission experiment

本実験のため、AUV の観測経路上に予め模型カニ(Fig.4. 15)を配置した。AUV は模型カニを発見してその画像送信、画像の受信を評価する。

実験手順は、台船により AUV の導入し、AUV が調査深度 30m まで潜航する。AUV は観測を始め、予めセットされた観測経路を移動しながら観測を行う。AUV が移動を開始すると音響モデムを搭載した支援船も共に移動を行う。観測中興味深い対象が撮影された場合、支援船へ送信を行う。観測が終了すると AUV は浮上を行う。実験結果を Fig.5. 5 に示す。

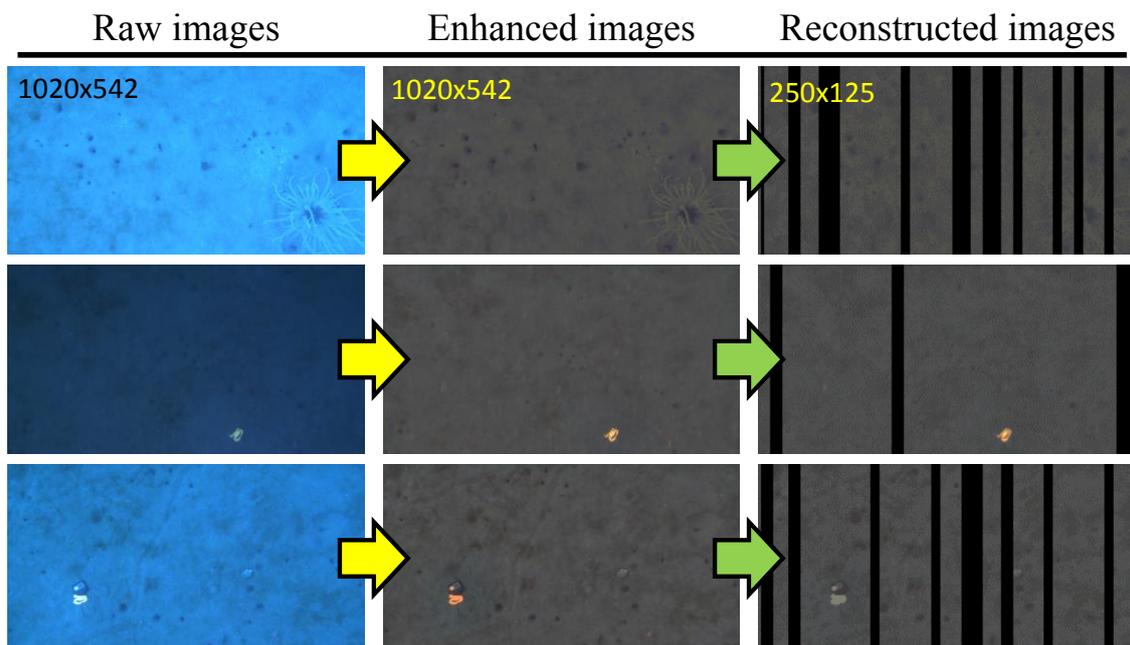


Fig.5. 5 The results of transmission experiment

Fig.5. 5 では、AUV が移動しながら撮影した元画像と元画像の補正結果と、送信し船上で復元した画像が示されている。1 番目の画像では、イソギンチャクが撮影されており、補正画像と受信画像でも対象が確認できる。2 番目の画像では模型カニが撮影されており、画像補正で対象の色も正しく復元されたことが確認された。また、受信画像でも対象の色と形位置などが正しく認識できる。しかし、3 番目の画像は、補正画像と受信画像の間に色の差がある。この問題は、カラーパレットの選択で起こった問題である。本実験が行われた時期（2016 年 2 月 22 日から 2 月 26 日）では、Fig.4. 5 で提案した画像圧縮のシステムが完成されてなかったため、Fig.4. 5 の AUV 側の interesting area 選択処理が行われてない。このため、入力全画像の全ピクセルに対してカラーパレットの選択を行った。画像の全ピクセルを画像内対象の領域が少ない場合、海底領域によりカラーパレットの選択ミスが発生する。この問題は、Fig.4. 5 の AUV 側の interesting area 選択処理により解決された。

5.2 オホーツク海調査

本調査では、2016年5月29日から6月5日、オホーツク海の海底生物調査のため、網走周辺海で調査を行った。本実験では、大深度での Sampling-AUV: TUNA-SAND2 の運用実験と音響画像通信実験の評価を目的にする。調査海域を Fig.5.6 に示す。

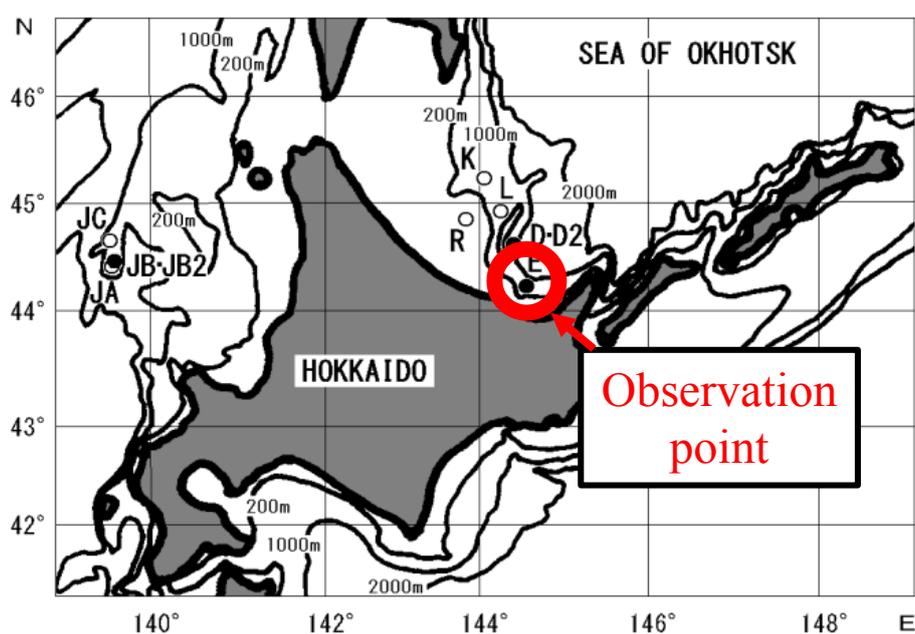


Fig.5.6 The observation point in the sea of Okhotsk

Fig.5.6 の調査海域の深度は 450~700m であり、AUV は海底まで潜航し調査を行った。調査に利用した調査船の様子を Fig.5.7 に示す。



Fig.5. 7 The research vessel: Hokko-maru

Fig.5. 7 の調査船北光丸は長さ : 64.73m、幅 : 11.90m、総トン数 : 1246 トンの調査船であり、船上のクレーンにより AUV などの装備の投入と揚水が可能な大型調査船である。本調査船により、AUV を調査海域まで運搬、深海の調査を行った。調査の結果を Fig.5. 8 に示す。

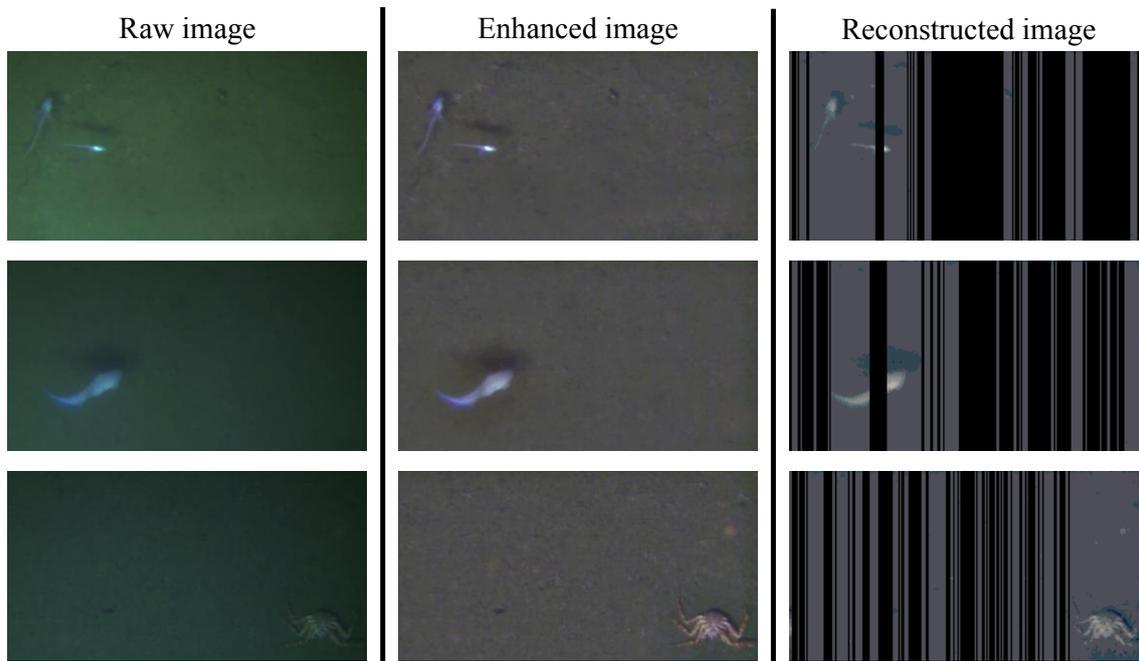


Fig.5. 8 The results of experiment in the sea of Okhotsk

Fig.5. 8 は元画像、補正画像、受信画像である。本調査では、AUV は 3 回投入されており、2 回はエラーによる浮上により海底画像の撮影が出来なかった。そのため、深海底画像の撮影と送信を行ったのは 1 回であり、カラーパレットを作成するための海底画像準備されてないため、最適のカラーパレットの作成が出来なかった。結果、Fig.5. 8 の Reconstructed image では、enhanced image とは少しい異なるカラーを持っている。

本調査で行った実験により、カラーパレットの最適化なしでも、撮影された対象の形と位置の確認ができた。

5.3 沖縄瀬底島サンゴ生息地調査

2016年7月10日から7月22まで、沖縄瀬底島サンゴ生息地で実機実験を行った。本実験は、AUVの音響画像送信システム動作の確認、AUVの観測経路追従動作の確認、AUVが音響復帰動作の確認を目的にした。

実験場所を Fig.5.9 に示す。



Fig.5.9 The observation point near the Sesoko island

Fig.5.9の左の丸はサンゴ生息地であり、約30m深度に広く分布している。調査では、AUVを運用するため、漁船にAUVの位置の確認のためのGAPSと調査船の位置把握のためのGPS、AUVが送信する画像を受け取るための受波機を配置した。利用した漁船の様子を Fig.5.10 に示す。



Fig.5. 10 The fish ship: Zen-ei maru for using AUV operation and experiment

Fig.5. 10 の善栄丸を用いて AUV を調査海域まで移動させた。AUV の移送はロープで繋ぎ移動を行った。移動の様子を Fig.5. 11 に示す。

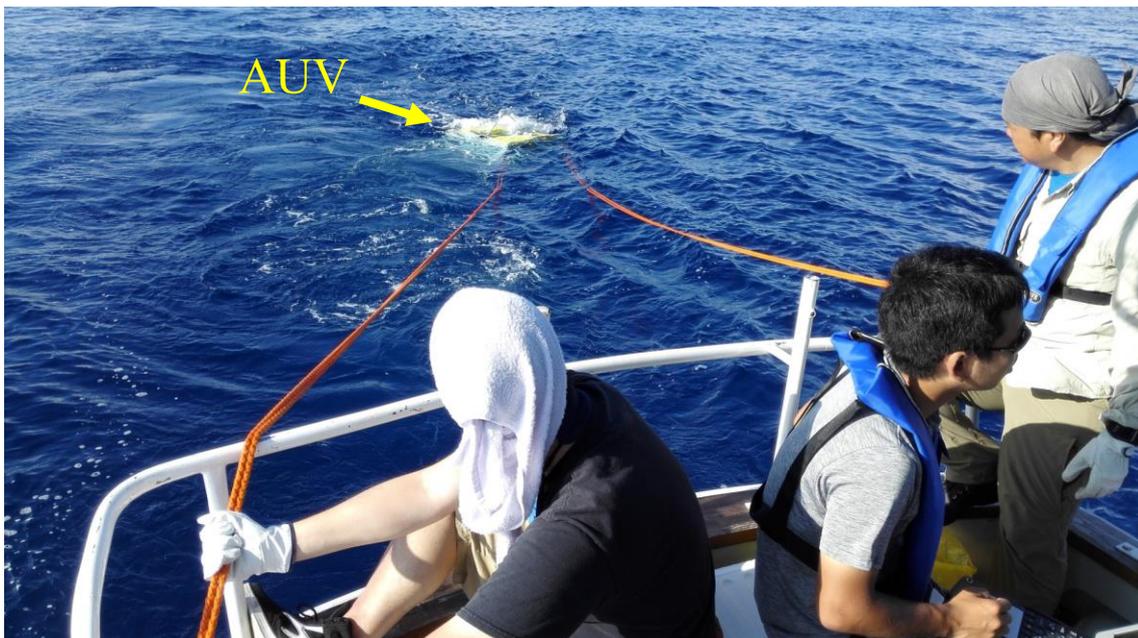


Fig.5. 11 The scene of AUV's carrying to observation point

本調査で AUV が撮影した画像と補正画像、そして船上で確認した画像を Fig.5. 12 と Fig.5. 13 に示す。

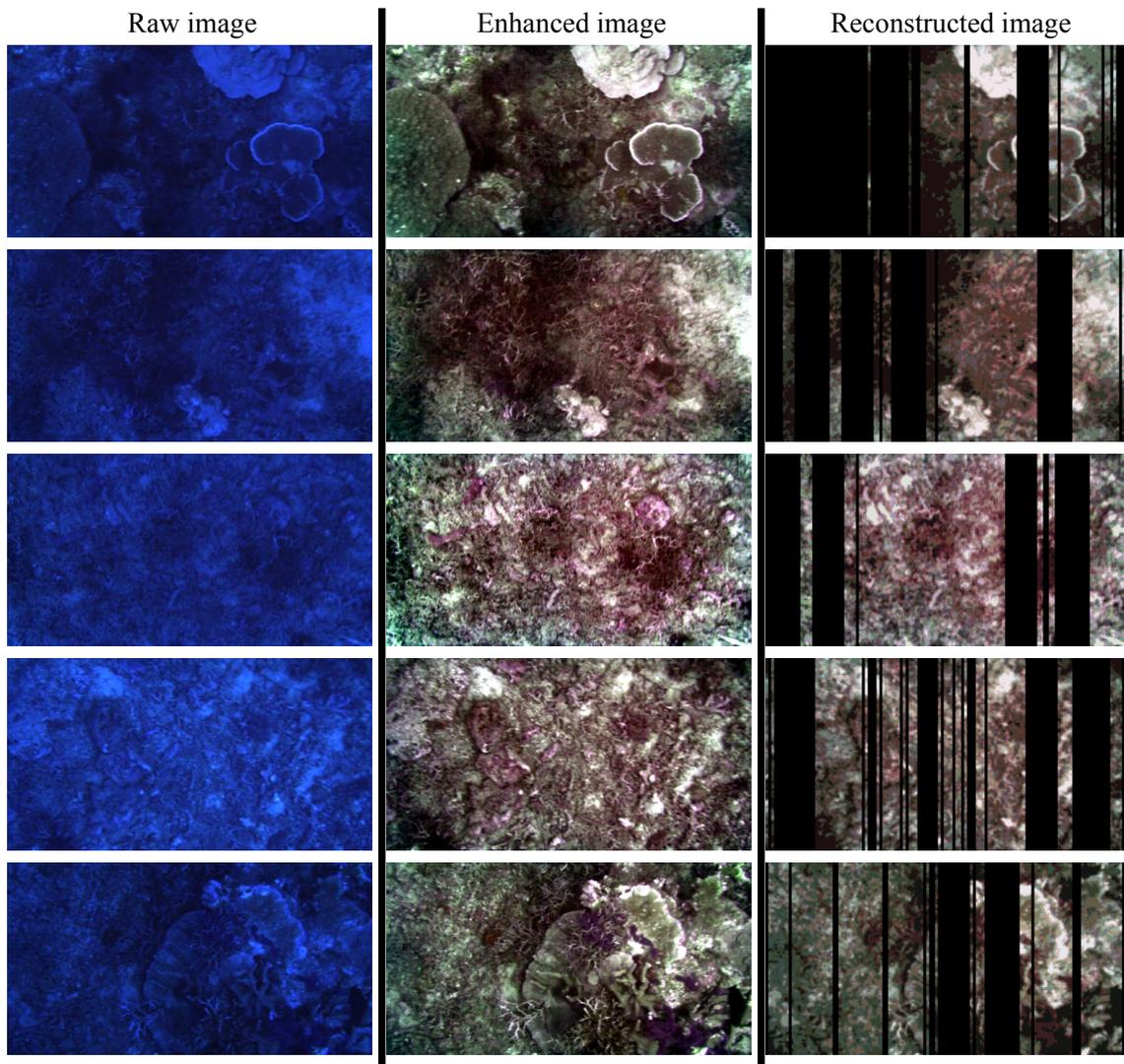


Fig.5. 12 The result of experiment in Sesocko (1)

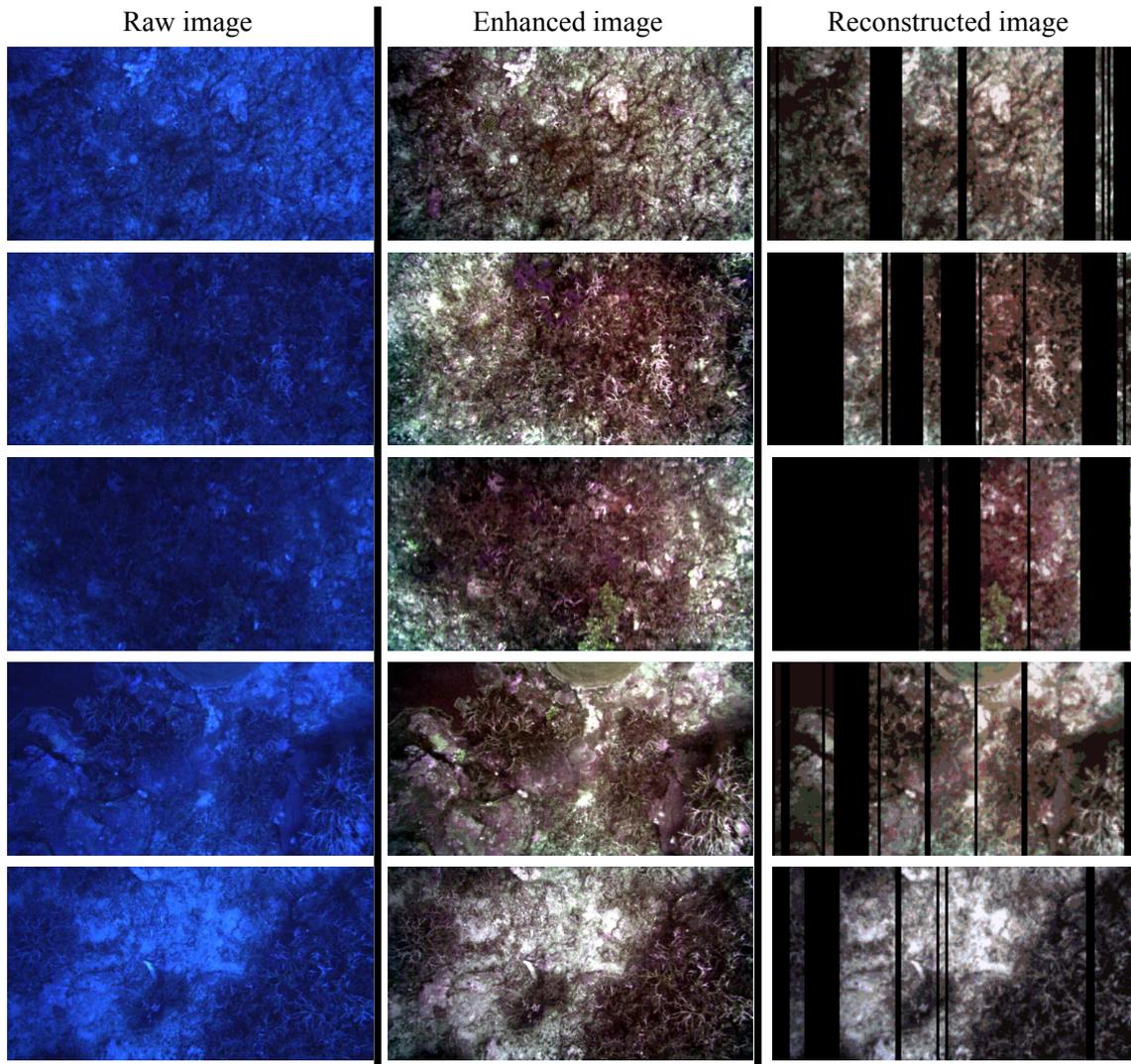


Fig.5. 13 The result of experiment in Sesocko (2)

Fig.5. 12 と Fig.5. 13 の Raw image は AUV が撮影した元画像であり、Enhanced image は補正画像、Reconstruction image は受信されたデータで再構築した画像である。Raw image は太陽光の影響により、画像全体が青く撮影されており、そのため、補正画像の赤が大きく強調された。再構築した画像では、補正画像の色と形状が確認出来た。

5.4 考察

本章では、本論文で提案したシステム（画像補正、画像選択、画像圧縮と復元）を、生物採取調査を目的として開発された Sampling-AUV:TUNA-SAND2 に搭載して実海域実験を行った。本実験は、3つの海域で行っており、静岡駿河湾（2016年2月22日～2月26日）、北海道のオホーツク海（2016年5月29日～6月5日）、沖縄瀬底島海岸（2016年7月10日～7月22日）で実施された。

静岡駿河湾での実験（実験深度：30m）では、AUVの観測経路追従動作の確認と画像補正システムと画像送信システム（圧縮と復元）動作の確認を目的にしており、AUVの観測経路追従の確認が出来た。また、画像送信システムに関しては、Fig.5.5の3目の画像のような問題が確認された。

北海道オホーツク海の実験（実験深度：450~700m）では、大深度での経路追従動作確認と画像送信システム（画像選択、圧縮と復元）の動作確認を行った。実験の結果、大深度での経路追従動作と画像送信システム動作が確認できた。

沖縄瀬底島での実験（実験深度：30m）では、AUVの音響画像送信システム動作の確認、AUVの観測経路追従動作の確認、AUVが音響復帰動作の確認を目的にしており、全システムの確認が出来た。

第 6 章

結論

6. 結論

本研究では、水中調査の自動化のための画像処理技術について研究を行った。特に膨大な海で広範囲かつ長時間調査可能な AUV のための“画像補正手法”、“興味深い画像選択手法”、“画像圧縮と復元手法”について述べた。

“画像補正手法”に関しては、Retinex 理論に基づいた照明光成分の排除と色相調整による水中での色減衰率を調整した。また、 γ 関数による画像のコントラスト補正と明度の補正を行った。これらの処理により、AUV による撮影された深海底画像が持つ、照明むらと色の減衰が解決された。

“興味深い画像選択手法”に関しては、音響通信は電波による通信と比較して低速であるため AUV が撮影した全ての画像らを送ることができない。このため、生物などが撮影された興味深い画像を選択し送信する必要がある。本研究では、対象認識による画像選択手法と注意モデルによる画像選択手法を提案した。

対象認識による画像選択手法に関しては、回転とスケールの変化にロバストな特性を持つ SIFT 特徴量を基に、生物のデータベースを作成する BoK アルゴリズムを用いて対象認識を行った。本手法を AUV により撮影された深海底画像らへ適用した結果、正答率 84%であった。正答率低下の原因としては、選択された候補領域内特徴量が不足している場合と、候補領域内にカニと石の特徴量が混在している場合であった。

注意モデルによる画像選択手法に関しては、人間の注意モデルである Itti-Koch モデルを基に画像内の注意位置と顕著度を求め画像の選択を行った。対象認識による画像選択手法は調査海域に対する情報が十分に蓄積された場合、即ち深海の画像から生息している生物らのデータベースの作成が可能である場合、有効に利用できるかと期待される。注意モデルによる画像選択手法は調査海域に対

する情報ない場合、有効に利用できる。

“画像の圧縮と復元手法”に関しては、データ損失が起こる音響通信に対して、受信されたデータが損失部を含まれている場合でも、復元できる圧縮手法を提案した。提案手法は 24bit カラー画像を 4bit カラー画像として圧縮しており、4bit カラー画像は海底画像でよく使用されるカラーにより作成されたカラーを基に構成される。このため、複数の海底画像から画像を構成している体系的なカラーを選択し、画像圧縮のためのカラーパレットとして使用する。本手法では、複数のカラーパレットを用いて一番適しているパレットを選び圧縮する方法を提案した。更に復元手法に関しては、カラーパレットにより圧縮された 4bit のデータとカラーパレットの番号を一緒に送信し船上で復元を行う手法を提案した。

本研究で述べた画像処理技術（画像補正、画像選択、画像圧縮、画像復元）を実際 AUV に搭載し、システム全体の動作実験を行った。動作実験は、水槽実験と実海域実験が行われており、水槽実験では、模型のカニを用意し AUV による画像送信を行った。水槽(25x10x5[m])実験の結果、72%の音響通信成功率が確認されており、受信画像から模型のカニが確認できた。

本研究により実現されたシステムの様子を Fig.6. 1 に示す。

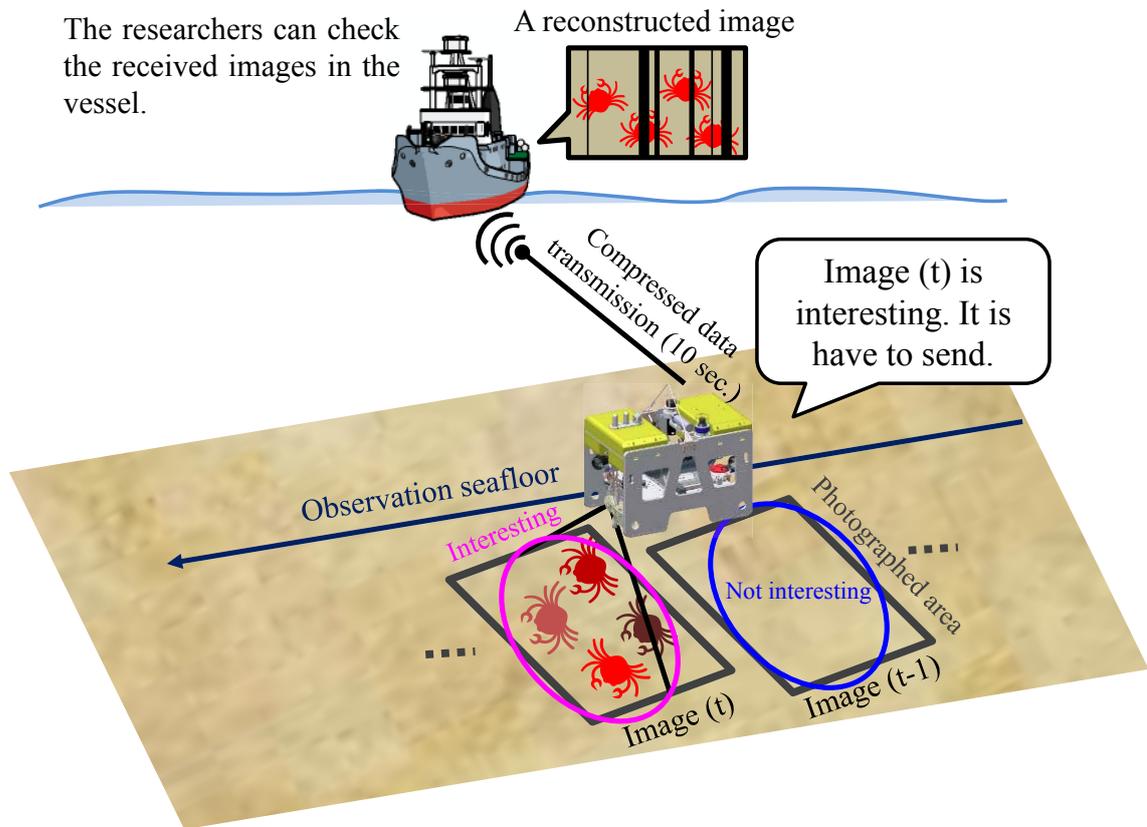


Fig.6. 1 The realized system by proposed image processing method

本研究により、Fig.6. 1 で示したシステムが完成された。AUV は自ら興味深い画像が撮影されたかどうかを判断し送信を行う。送信は約 10 秒で 1 枚の画像を送信する。調査船上の科学者たちは、送信された画像をほぼリアルタイムで確認できる。本システムを用いた実海域実験は、駿河湾、オホーツク海、沖縄瀬底島で行われており、各実験の結果、一つの画像送信は約 10 秒で行われており、船上で AUV により撮影された画像を確認することができた。この実験らにより、本研究で提案した AUV と調査船間のコミュニケーションによる新たな海底調査戦略が達成できた。

今後の展望として、本システムの機能の拡張が必要とされる。画像補正に関しては、より正確な照明光成分の推定が必要とされる。このためには、異なる

スケールを用いたガウシアンフィルターによる照明光推定(Multi-Scale Retinex, MSR)を利用する手法などが提案されている [25] [50]。しかし、MSR は複数のガウシアンフィルターを用いるため、本稿で提案した SSR(Single-Scale Retinex)より演算コストが高い。このため、システムの高高速化なしではオンラインでの処理は容易ではない。画像圧縮に関しては、カラーパレットの作成手法の改良が必要とされる。本稿では、基礎的な色量子化手法(Median-cut)を用いたが、近年より効果的な手法らが提案されている [51, 52, 53]。色量子化は、圧縮画像の質に直接的に影響を及ぼすため、より多様な量子化手法を利用かつ結果分析などが必要となる。また、画像送信に関しては、観測中撮影された画像の中で生物の領域だけで一枚の画像として再構築したターゲット画像の作成と送信などのシステムが現場で求められている。

これらのシステムを構築かつ研究を行うことで、海底調査がより高速化されると期待している。

参考文献

- [1] J. Erickson, 海洋の神秘, オーム社, 1992.
- [2] 浦環、高川真一, 海中ロボット総覧, 成山堂書店, 1994.
- [3] Census of Marine Life, 海洋生物の持続的利用と保護を支援する科学的結果-意思決定者のための海洋生物センサスの概要, 2011.3.
- [4] 東京大学大学院新領域創成科学研究科, “深海底で「木を見る森を見る」計画,” [オンライン]. Available: <http://www.otpe.k.u-tokyo.ac.jp/project.html?key=1351655560>. [アクセス日: 13 2 2017].
- [5] 克則藤倉, 正丸山, 喬司奥谷, 潜水調査船が観た深海生物—深海生物研究の現在, 東海大学出版会, 2008.
- [6] Y. Junku, T. Ura, G. Bekey, Underwater robots, Springer Science & Business Media, 1996.
- [7] J. Yuh, M. West, “Underwater robotics,” Advanced Robotics, 2001.
- [8] L. L. Whitcomb, “Underwater robotics: Out of the research laboratory and into the field,” Robotics and Automation, ICRA'00. IEEE International Conference Vol.1 pp. 709-716, 2000.
- [9] T. Ura, “Observation of Deep Seafloor by Autonomous Underwater Vehicle,” IJMS, 42.8, pp. 1028-1033, 2013.
- [10] T. Maki, Y. Sato, T. Matsuda, R. T. Shiroku, T. Sakamaki, “AUV Tri-TON 2: An intelligent platform for detailed survey of hydrothermal vent fields,” IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). 2014. pp. 1-5, 2014.
- [11] T. Nakatani, T. Ura, Y. Ito, J. Kojima, K. Tamura, T. Sakamaki, Y. Nose, “AUV” TUNA-SAND” and its Exploration of hydrothermal vents at Kagoshima Bay,” OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, pp. 1-5, 2008.
- [12] Y. Nishida, T. Ura, T. Sakamaki, J. Kojima, Y. Ito, K. Kim, “Hovering Type AUV “Tuna-Sand” and Its Surveys on Smith Caldera in Izu-Ogasawara Ocean Area,” 2013 OCEANS-San Diego. IEEE pp.1-5, 2013.
- [13] Y. Nishida, K. Nagahashi, T. Sato, A. Bodenmann, B. Thornton, A. Asada, T. Ura, “Development of an autonomous underwater vehicle for survey of cobalt-rich manganese crust,” OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington, pp. 1-5, 2015.
- [14] 東京大学海洋研究所, 海洋のしくみ, 日本実業出版社, 1997.

- [15] M. R. Clark, M. Consalvey , A. A. Rowden, Biological Sampling in the Deep Sea, Wiley-Blackwell, 2016.
- [16] E. O. Hulburt, “Optics of Distilled and Natural Water,” Journal of the Optical Society of America, Vol.35, pp.689-705, 1945.
- [17] R. H. Stavn, “Lambert-Beer law in ocean waters: optical properties of water and of dissolved/suspended material, optical energy budgets,” Applied optics 27.2 pp. 222-231, 1988.
- [18] B. L. McGlamery, “A computer model for underwater camera systems,” Ocean Optics VI. International Society for Optics and Photonics pp. 221-231, 1980.
- [19] J. S. Jaffe, “Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems,” IEEE Journal of Oceanic Engineering 15.2. pp. 101-111, 1990.
- [20] A. Yamashita, M. Fujii , T. Kaneko, “Color registration of underwater images for underwater sensing with consideration of light attenuation,” IEEE International Conference on Robotics and Automation 2007. pp. 4570-4575, 2007.
- [21] K. Iqbal, R. A. Salam, A. Osman , A. Z. Talib, “Underwater image enhancement using an integrated color model,” International Journal of Computer Science vol. 32.2 pp. 239-244, 2007.
- [22] S. Bazeille, I. Quidu, J. L. , J. P. Malkasse, “Automatic underwater image pre-processing,” CMM'06, pp. 1-9, 2006.
- [23] E. H. Land , J. J. McCann., “Lightness and retinex theory,” JOSA 61.1. pp. 1-11, 1971.
- [24] H. Singh, C. Roman, O. Pizarro, R. Eustice , A. Can, “Towards high-resolution imaging from underwater vehicles,” The International journal of robotics research 26.1, pp. 55-74., 2007.
- [25] Z. Rahman, D. J. Jobson , G. A. Woodell, “Retinex processing for automatic image enhancement,” Journal of Electronic Imaging 13.1. pp. 100-110, 2004.
- [26] X. Fu, P. Zhuang, Y. Huang, Y. Liao, X.-P. Zhang , X. Ding, “A retinex-based enhancing approach for single underwater image,” Image Processing (ICIP), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 4572-4576, 2014.
- [27] A. R. SM , S. MH, “Underwater image enhancement using single scale retinex on a reconfigurable hardware,” Ocean Electronics (SYMPOL), 2015 International Symposium on. IEEE, pp. 1-5, 2015.
- [28] 日本サバイバルトレーニングセンター, “Nippon Survival Training Center,” [オンライン]. Available: https://nstc.nissui-marine.co.jp/nsm_nstc/calendar.php. [アクセス]

ス日: 17 2 2017].

- [29] M. Bewley, B. Douillard, N. Nourani-Vatani, A. Friedman, O. Pizarro , S. Williams, “Automated species detection: An experimental approach to kelp detection from sea-floor AUV images,” Australasian Conference on Robotics and Automation, pp. 1-10, 2012.
- [30] M. Boudhane , B. Nsiri, “Underwater image processing method for fish localization and detection in submarine environment,” Journal of Visual Communication and Image Representation Vol. 39, pp. 226-238, 2016.
- [31] H. Qin, X. Li, J. Liang, Y. Peng , C. Zhang, “DeepFish: Accurate underwater live fish recognition with a deep architecture,” Neurocomputing 187 pp. 49-58, 2016.
- [32] D. Zhang, D. Lee, M. Zhang, B. Tippetts , K. Lillywhite, “Object recognition algorithm for the automatic identification and removal of invasive fish,” Biosystems Engineering 145 pp. 65-75, 2016.
- [33] Y. Hsiao, C. Chen, S. Lin , F. Lin, “Real-world underwater fish recognition and identification, using sparse representation,” Ecological Informatics 23 pp.13-21, 2014.
- [34] D. G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” International journal of computer vision 60.2. pp. 91-110, 2004.
- [35] G. Csurka, C. Dance, L. Fan, J. Willamowski , C. Bray, “Visual categorization with bags of keypoints,” Workshop on statistical learning in computer vision, ECCV Vol. 1. No. 1-22, pp. 1-16, 2004.
- [36] L. Itti , C. Koch, “A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention,” Vision research 40.10. pp. 1489-1506, 2000.
- [37] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer-Verlag London, 2010.
- [38] A. M. Treisman , G. Gelade, “A feature-integration theory of attention,” Cognitive Psychology, Vol. 12, No. 1, pp. 97-136, 1980.
- [39] Saliencytoolbox, “<http://www.saliencytoolbox.net/index.html>,” [オンライン]. [アクセス日: 23 2 2017].
- [40] D. Walther , C. Koch, “Modeling attention to salient proto-objects,” Neural networks 19.9 pp. 395-1407, 2006.
- [41] D. F. Hoag, Vinay K. Ingle , R. J. Gaudette., “Low-bit-rate coding of underwater video using wavelet-based compression algorithms,” IEEE Journal of Oceanic Engineering 22.2, p393-400, 1997.

- [42] N. Suzuki, H. Kitajima, H. Kaba, T. Suzuki, T. Suto, A. Kobayashi , F. Ochi, “An experiment of real-time data transmission of sonar images from cruising UUV to distant support vessel via USV: Development of underwater real-time communication system (URCS) by parallel cruising,” OCEANS 2015-Genova. IEEE pp.1-6, 2015.
- [43] JPEG, “JPEG,” [オンライン]. Available: <https://jpeg.org/jpeg/index.html>. [アクセス日: 1 12 2016].
- [44] J. Ahn, S. Yasukawa, T. Sonoda, Y. Nishida, K. Ishii , T. Ura, “Image enhancement and compression of deep-sea floor image for acoustic transmission,” OCEANS 2016-Shanghai. IEEE, pp. 1-6, 2016.
- [45] P. Heckbert, “Color image quantization for frame buffer display,” ACM Vol. 16. No. 3. pp. 297-307, 1982.
- [46] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh , E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity,” IEEE transactions on image processing 13.4 pp. 600-612, 2004.
- [47] 東京大学生産技術研究所, “東京大学生産技術研究所 千葉実験所,” [オンライン]. Available: <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/chiba/>. [アクセス日: 17 02 2017].
- [48] Y. Nishida, T. Sonoda, S. Yasukawa, J. Ahn, K. Nagano, K. Ishii , T. Ura, “Development of an Autonomous Underwater Vehicle with Human-aware Robot Navigation,” MTS/IEEE Oceans16 Monterey pp. 1-4, 2016.
- [49] M. Takeda, J. Hashimoto , S. Ohta., “A new species of the family Bythograeidae (Crustacea, Decapoda, Brachyura) from the hydrothermal vents along volcanic front of the Philippine Sea Plate.,” Bulletin of the National Science Museum, Tokyo, series A, Zoology 26.4, pp.159-172, 2000.
- [50] S. Zhang, T. Wang, J. Dong , H. Yu, “Underwater Image Enhancement via Extended Multi-Scale Retinex,” Neurocomputing2017, 2017.
- [51] M. Pérez-Delgado, “Colour quantization with Ant-tree,” Applied Soft Computing 36, pp. 656-669, 2015.
- [52] M. Ponti, T. Nazaré , G. Thumé, “Image quantization as a dimensionality reduction procedure in color and texture feature extraction,” Neurocomputing 173, pp. 385-396, 2016.
- [53] X. Yue, D. Miao, L. Cao, Q. Wu , Y. Chen, “An efficient color quantization based on generic roughness measure,” Pattern Recognition 47.4 pp. 1777-1789, 2014.

謝辞

本研究は、九州工業大学大学院生命体工学研究科における研究活動の中で、多くの方々のご指導とご協力で行うことが出来ました。ここで皆様への感謝を記述します。

九州工業大学大学院生命体工学専攻石井和男教授には、指導教官として多大なるご指導を頂きました。研究においては、助言と方向性、そして最後まで諦めなく妥協せず真摯な態度で研究を続ける精神を教えて頂きました。また、国内の水中ロボコンや、国際水中ロボット競技会 Robosub、国内と国際学会、ハワイ大学での Internship、平塚や沖縄や北海道などの航海実験、などに参加する機会を与えて下さりました。石井先生と過ごした 5 年間は、とても楽しく充実な時間でした。ここで深く感謝致します。

九州工業大学社会ロボット具現化センターセンター長浦環教授には、研究に関する多大なる指導を頂きました。また、実海域での実験に参加できる機会を頂き、実際利用される海中ロボットに対して勉強できました。また、論文のご指導などを頂き、より良い論文を出版することが出来ました。ここで深く感謝致します。

この論文の執筆するにあたり、ご指導とご助言を頂きました、九州工業大学大学院生命体工学専攻和田親宗教授、宮本弘之准教授、九州工業大学情報工学部林英治教授に厚く御礼を申し上げます。

九州工業大学大学院生命体工学専攻園田隆特任準教授には、研究を含む自分の大学院生活で、多大なる指導を頂きました。園田先生の温かいご指導が自分にとって大きな支えとなり 5 年間無事に研究を続けることが出来ました。ここで深く感謝致します。

九州工業大学大学院生命体工学専攻西田特任助教には、自分の研究と実験などで指導を頂きました。西田先生のご指導の下で自分の研究を続けることが出来ました。ここで深く感謝致します。

同研究室の安川真輔研究員には、研究とその方向性でご指導とご助言を頂きました。特に画像処理の技術的な指導で、自分が大きく成長することが出来ました。また、真摯に研究を進める姿を見せて頂くとても勉強になりました。この 3 年間とてもお世話になりました。ここで深く感謝致します。

同研究室の Tharindu Weerakoon 研究員には、自分の研究と実験などのご指導とご助言を頂きました。ここで深く感謝致します。

石井研究室の先輩と同期そして後輩たちにも、ここで深く感謝致します。

安 鍾賢