

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

航海士の鼻部皮膚温度の自動計測に関する基礎研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-11-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 久保, 裕一郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2256

修士学位論文

航海士の鼻部皮膚温度の自動計測に 関する基礎研究

2021 年度
(2021 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

久保 裕一郎

修士学位論文

航海士の鼻部皮膚温度の自動計測に 関する基礎研究

2021 年度
(2021 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

久保 裕一郎

目次

第 1 章	はじめに.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	研究目的.....	2
1.3	論文構成.....	2
第 2 章	海運業界の現状.....	3
2.1	海運業界の課題.....	3
2.2	海難の定義.....	3
2.3	海難の現状.....	3
2.4	海難の原因.....	5
2.5	船員問題の現状.....	5
2.6	船員不足問題の原因.....	7
2.7	課題に対する取り組み.....	7
第 3 章	メンタルワークロード.....	8
3.1	メンタルワークロードの概要.....	8
3.2	メンタルワークロードの測定方法.....	9
3.3	メンタルワークロードとヒューマンエラー.....	15
第 4 章	鼻部皮膚温度の自動計測方法.....	21
4.1	鼻部皮膚温度の自動計測に用いるセンサー.....	21
4.2	Kinect の鼻部座標を用いた鼻部皮膚温度の自動取得方法.....	32
第 5 章	Kinect の性能検証実験.....	43
5.1	日光による Kinect の顔認識への影響.....	43
5.2	距離による Kinect の顔認識への影響.....	52
5.3	顔の角度変化による Kinect の顔認識への影響.....	54
5.4	Kinect の顔認識の角度限界.....	60
5.5	Kinect の顔認識と体の情報との関連性.....	64
5.6	Kinect を上下逆さに設置した際の影響.....	66
第 6 章	実船実験.....	67
6.1	調査・研究船やよい.....	67
6.2	実験概要.....	69
6.3	実験被験者.....	69
6.4	計測項目.....	69
第 7 章	鼻部皮膚温度の自動計測結果.....	75

7.1 実験結果.....	75
7.2 統計検定用いた実験結果の検定	83
7.3 赤外線画像の測定間隔による実験結果の比較.....	90
第8章 考察.....	94
8.1 鼻部皮膚温度の変化と心的負荷に関する考察.....	94
8.2 鼻部皮膚温度の自動計測の実船での利用に関する考察.....	95
8.3 今後の展望	97
第9章 おわりに.....	100
参考文献	101
謝辞.....	105

本論文では、事故につながるような心的なストレス・メンタルワークロードなどを総称して「心的負荷」を使用した。ただし、文献を引用した箇所については、文献で使用されている単語をそのまま使用した。

第1章 はじめに

1.1 研究背景

近年、海運業界が直面している問題にヒューマンエラーによる海難の存在がある。以前は船体構造や航海計器などの技術が発達していなかったため、荒天時などにそれらハード面が原因となり海難が発生することが多かった。しかしハード面の技術が発達した現在では、それら航海計器等のハードを扱う操船者が原因となる海難が増加し、注目を集めている。

また、近年では船員の減少や高齢化も問題として指摘されている。国土交通省発行の平成23年版海事レポート及び、数字で見る海事2021では、我が国の船員数はピーク時の昭和49年には約27.8万人であったが、令和2年年10月には約6.4万人に減少していると報告されている[1][2]。また、日本内航海運組合総連合会が公表している内航船員の現状では、令和元年10月時点での内航船員の年齢構成比を見ると、50歳以上の船員が5割を超え、高齢化が進んでいることが報告されている。また船員の高齢化が内航業界において喫緊の課題となっている[3]。もちろん航海計器の発達や船員の見張り支援機器の開発に伴い、安全な操船に必要な船員の数は減少していくものと考えられる。しかし、船舶毎の船員数が減少することで、船員1人当たりの作業負担が増え、それによりヒューマンエラーの発生が増加することも予想できる。また、近年では国内外で無人運航船の研究も盛んに行われている。2014年に開催された海事カンファレンスSMMでは、「プロジェクトMUNIN」のワークショップが行われた。これはEUが支援する研究プロジェクトで、港から港まで無人で公海できるロボット船を開発しようというものだった[4]。また日本では2020年、日本財団が無人運航船の実証実験を行う民間企業体に対し研究費用の支援を行うことを決定した。本事業では、2021年度末までに実証実験を行い、2025年までに無人運航船の実用化を目指すものである[5]。実用的な無人運航船が開発されることにより、船員の減少や高齢化問題、エネルギー問題は大きく解決に向かうと考えられる。しかし、無人運航船技術の実用化には法律面や保険面で数多くの課題が残っており、実現は当分先になると予想できる。つまり現状では、操船者の作業負担軽減や、ヒューマンエラーの抑制に関わる研究がまだ必要であると言える。

海上保安庁の令和元年海難の現状と対策によると、令和元年の原因別海難発生隻数の割合では、見張り不十分などのヒューマンエラーによるものが全体の約73%を占めている[6]。現在、ヒューマンエラーによる事故の発生は海運業界だけでなく航空業界や鉄道業界、陸運業界等多くの場所で問題視されており、ヒューマンエラーにつながる原因の一つとして、人間の心的負荷が考えられている。

心的負荷の計測はシミュレータ実験において被験者の評価に用いられることがある。戸羽氏らによる生理指標を用いたシミュレータ教育訓練時におけるトレーナートレーニー心的負荷評価に関する研究では心拍変動解析から算出されたLH/HF (Low Frequency / Hi Frequency) 値により、被験者の心的負荷の程度を比較検討している[7]。また心的負荷は、新たな実験の評価手法の検討などにも利用される。井上一規氏らによる操船シミュレータ訓練時の状況認識計測についての基礎研究では、被験者の心拍変動により心的負荷の変化を確認し、操船シミュレータ実験におけるSAGAT(Situation Awareness Global Assessment Technique)と呼ばれる手法の有効性を示している[8]。

1.2 研究目的

人間の心的負荷を計測する方法としては、心拍変動や脳波、唾液を計測する方法が一般的に知られている。しかし、これら従来の計測方法では、実験中に被験者にセンサー等を装着してもらう必要がある場合や、実験を一時中断して唾液を採取する必要があった。つまり、これらの計測方法は、被験者の行動に制限がかかり、計測行為自体が被験者に心的負荷をかけ、正確な心的負荷変動のデータを得られていない可能性があるという問題点があった。そこで本研究では、被験者に非接触で計測することができる、鼻部皮膚温度による心的負荷の計測に注目した。この鼻部皮膚温度の計測による心的負荷の算出では、まず被験者を赤外線センサーで撮影し被験者の表面温度データから鼻部温度を抽出する。次に被験者の鼻部皮膚温度の時間的変化から、心的負荷の変動を計測する方法である。鼻部皮膚温度計測は、被験者にセンサー等を装着してもらう必要がなく、実験を中断する必要もない。つまり、被験者に余計な心的負荷を与える心配がない心的負荷計測方法の一つであると言える。しかし鼻部皮膚温度から心的負荷を計測するには、赤外線センサーで得られた赤外線画像から被験者の鼻の位置を特定し温度を記録するという作業を手動で行う必要がある。つまり、分析者によって鼻の位置の特定精度ばらつきがある可能性があり、手動作業が大半を占めることから、作業に多くの時間がかかるという問題点があった。

そこで卒業研究「汎用モーションセンサーと赤外線センサーによる鼻部皮膚温度の自動計測」では、赤外線センサーを汎用モーションセンサーと併用することで、被験者の鼻の位置を自動で特定し鼻部皮膚温度を自動で抽出する手法を提案した。そして室内の操船シミュレーターを使用した実験における有効性を示した。本研究では、より実用面でのシステムを提案するにあたり、船体動揺や日光等の外部からの影響が多く存在すると考えられる実船において、被験者の鼻の位置を自動で特定し鼻部皮膚温度を自動で抽出する手法の有効性を示すことを目的とした。また、実船で計測した鼻部皮膚温度から被験者の心的負荷の変化を予想することができるか検証することとした。

1.3 論文構成

本論文では、研究背景として第2章で海難の現状について説明し、第3章でメンタルワークロードとその計測方法について記述する。第4章では鼻部皮膚温度の自動計測手法について記述し、第5章では使用した汎用モーションセンサーである Kinect の性能検証について、第6章及び第7章では実船実験とその実験結果を述べる。そして第8章で実験結果からの考察を記述し、第9章で本研究の結論を述べる。

第2章 海運業界の現状

2.1 海運業界の課題[9]

日本は海に囲まれた島国であるため、他国との貿易において海運は必要不可欠なものである。日本の貿易量は年間9億トン以上であり、そのうちの99.7%を海上輸送が担っている。これは全世界の海上貿易量である約55億トンの約6分の1にもなる。さらに日本の海上輸送の66.9%を日本商船隊が担っている。このことから日本の海運業界は、日本のみならず世界規模で人々の生活を支えていることが分かる。日本の海運業界において現在問題視されているものの中に、ヒューマンエラーによる海難の問題、船員問題がある。この章ではこの2つの問題に関して詳しく説明する。

2.2 海難の定義[10]

「海難」という言葉の定義は海難審判法第1章第2条の定義では以下のようなものと定められている。

- ① 船舶の運用に関連した船舶又は船舶以外の施設の損傷
- ② 船舶の構造、設備又は運用に関連した人の損傷
- ③ 船舶の安全又は運航の阻害

一方、海上保安庁の発行している海上保安統計年報では「要救助海難」とは、海上において次の事態が生じた場合で、事態発生当時救助を必要としたと認められるものをいうとされている。

- ① 船舶の衝突、乗揚げ、火災、爆発、浸水、転覆、行方不明
- ② 船舶の機関、推進器、舵の損傷、その他船舶の損傷
- ③ 船舶の安全が阻害された事態

海上保安庁の統計には、海難審判にかけられなかった比較的軽微な海難も含まれており、実際に生じた海難の状況をより詳しく把握することができる。そのため本研究では、海上保安庁の統計データを用いて海難の現状を調べた。

2.3 海難の現状[6][11][12]

前述の通り、日本の貿易量の99.7%は海上輸送が担っている、そのため日本沿岸海域では非常に多くの船舶が航行している。全国港湾取扱貨物量の17%を占める東京湾の船舶の状況は1日に約500隻航行しており、世界有数の海上交通過密海域であると報告されている。世界の主要海域における1日当たりの航行量は、パナマ運河で約40隻、スエズ運河で約45隻、マラッカ・シンガポール海峡で約320隻である。このことから、東京湾の海上交通の過密度が分かる。しかし、この船舶航行量データはAISを搭載した船舶のみのデータである。日本沿岸海域では、内航船やプレジャーボート及び漁船等の小型船も数多く通航しており、AISを積載していない船舶も多く存在する。東京湾ではAISを搭載していない船舶を含めると1日約1500隻が航行しているとも言われている。このように日本沿岸海域では、通航隻数の多さや小型船から大型船まで多様な船舶が航行していることで、輻輳海域を中心に多くの海難が発生していると考えられる。

図 2.3.1 に平成 22 年から令和元年にかけて発生した船舶事故隻数の推移を示す。船舶事故とは海上保安庁で、船舶の運航に関連した損害や具体的な危険が生じたものと定義されたものである。図 2.3.1 の縦軸は船舶事故隻数、横軸は年である。海上保安庁は、2029 年までに我が国周辺で発生する船舶事故隻数を約 1200 隻以下とすることを目標とする第 10 次交通安全基本計画の作成と共に船舶交通の安全確保等を行っている。そのため、船舶事故の発生隻数は図 2.3.1 のように減少傾向にある。しかし近年、船舶隻数も減少傾向にあり、船舶事故の発生割合としては大きく減少はしていないものと考えられる。また、船舶の減少に伴い近年では船舶の大型化が進んでいる。図 2.3.2 は国土交通省によって報告された内航船舶の隻数、総トン数、平均総トン数の推移である。2000 年から 2017 年までの間、隻数は減少傾向にあ

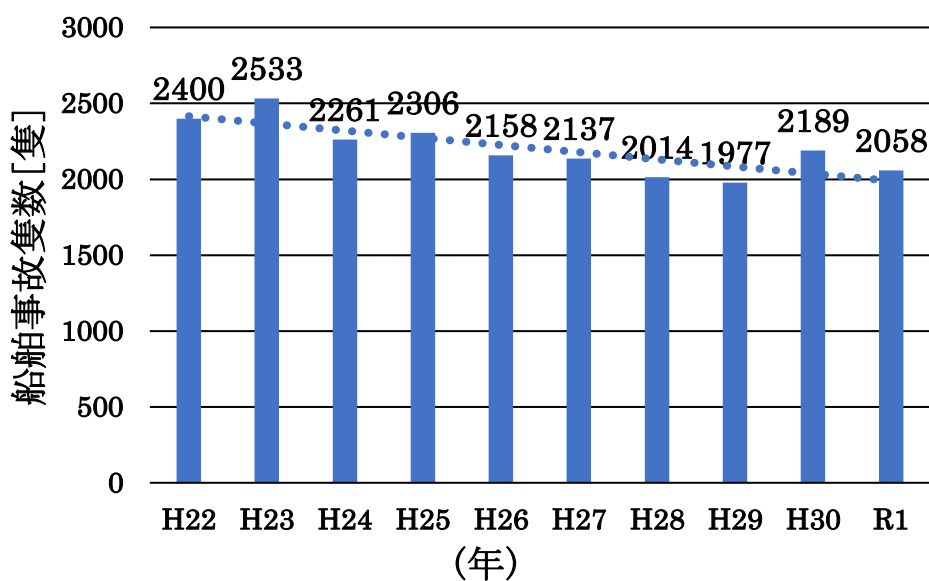


図 2.3.1 船舶事故隻数の推移

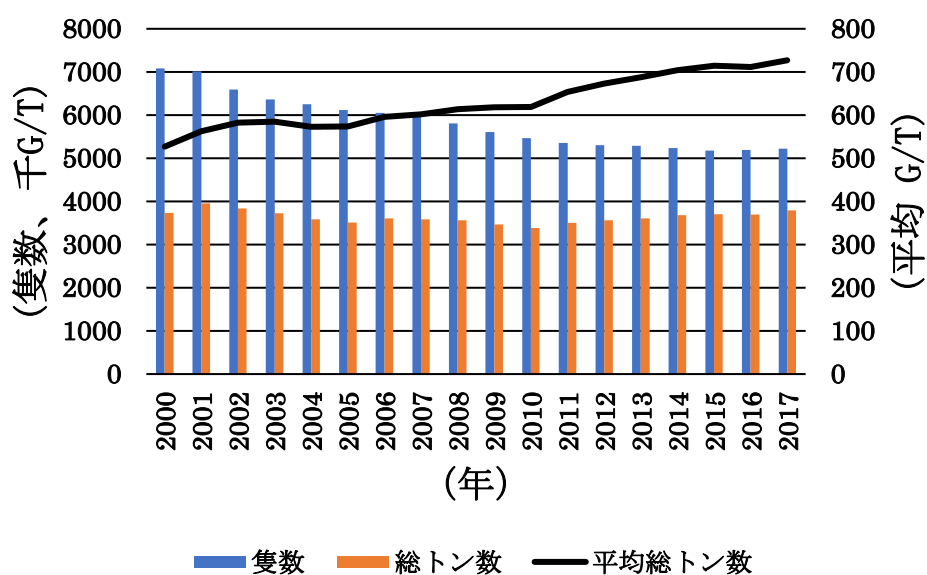


図 2.3.2 内航船舶の推移

るものの、総トン数はあまり変化がなくほぼ横ばいとなり、平均総トン数が増加している。海難発生時の被害の大きさを考慮すると、船舶事故の発生数が減少傾向とはいえ、これからも海難への対策を取る必要があると言える。

2.4 海難の原因[6]

令和元年に海上保安庁から発行された海難の現状と対策によると、令和元年の海難発生隻数は 2058 隻であった。図 2.4.1 は平成 19 年から令和元年までの期間における、海難の原因別発生割合を示している。海難原因の約 75%は海上保安庁が人為的要因(ヒューマンエラー)であると定めたものが原因となっている。その中でも特に多いのは、見張り不十分(20%)、操船不適切(14%)である。したがって、ヒューマンエラーを減少させることが海難を減少させるために最も重要なことであると分かる。

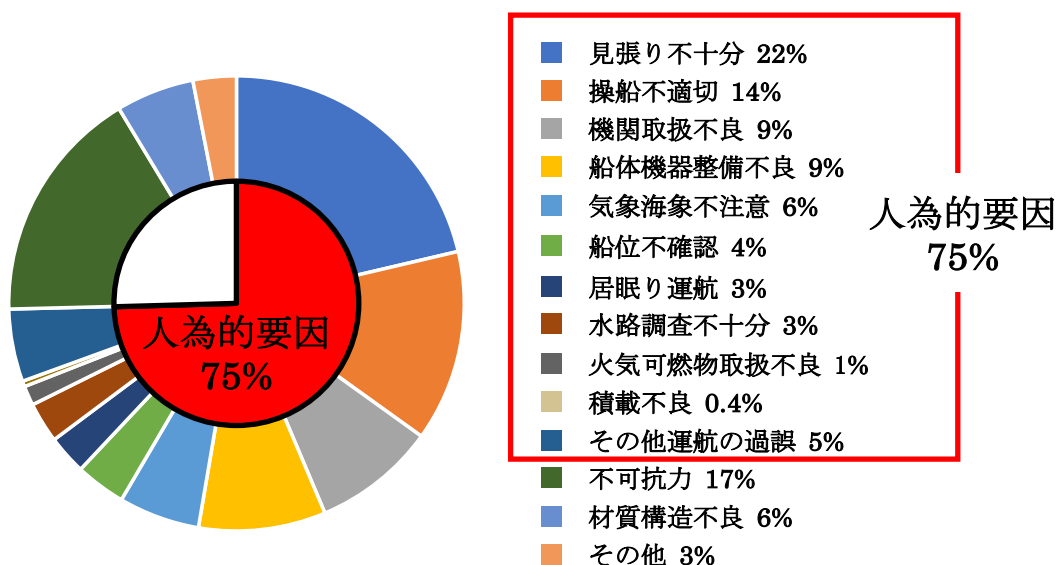


図 2.4.1 平成 19 年から令和元年の原因別海難発生割合

2.5 船員問題の現状[13][14][15]

現在、海運業界では船員の不足や船員数の高齢化といった問題が生じている。図 2.5.1 は昭和 49 年から平成 23 年の日本の船員数の推移である。縦軸は船員数、横軸は年である。また青色は外航船員、オレンジ色は内航船員、緑色は漁業船員、黄色はその他の船員の数を表示している。昭和 49 年には合計で約 27.8 万人であったが、近年減少の傾向はおさえられているものの、平成 24 年には 6.7 万人にまで減少している。内訳をみても外航船員を筆頭に、内航船員、漁業船員、その他と業界全体を通して船員数が減少していることが分かる。

また、図 2.5.2 は令和元年時点での船員の分野別年齢構成比である。縦軸は構成割合、横軸は船員の分野が示されている。また、青色は 29 歳以下、オレンジ色は 30 歳以上 39 歳以下、灰色は 40 歳以上 49 歳以下、黄色は 50 歳以上 59 歳以下、水色は 60 歳以上 69 歳以下、緑色は 70 歳以上の船員の構成割合を示している。これを見ると外航船員は他の分野と比べて比較的若年である 39 歳以下の割合が約 60%と高い。この理由としては、外航船員は陸上での船舶管理業務などにも従事しており、海上勤務者自体は若年層が多いためであると考えられる。

一方で内航船は50歳以上の割合が約45%を占めており高齡化が進んでいることが分かる。

平成29年に国土交通省が東北管内内航船事業者の船員に行ったアンケートでは、回答全体の58.8%が「船員が不足している、もしくは今後不足の見込みである」と回答している。また船員の特殊性、地域性の問題等によって新たな船員の確保が困難であるという結果も得られている。このように船員の高齡化問題は海運業界、特に内航船において喫緊の問題となっている。

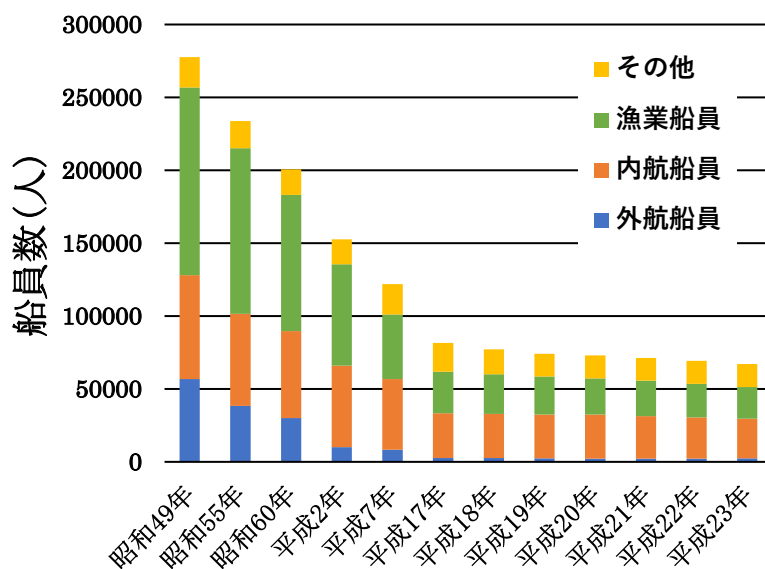


図 2.5.1 日本の船員数の推移

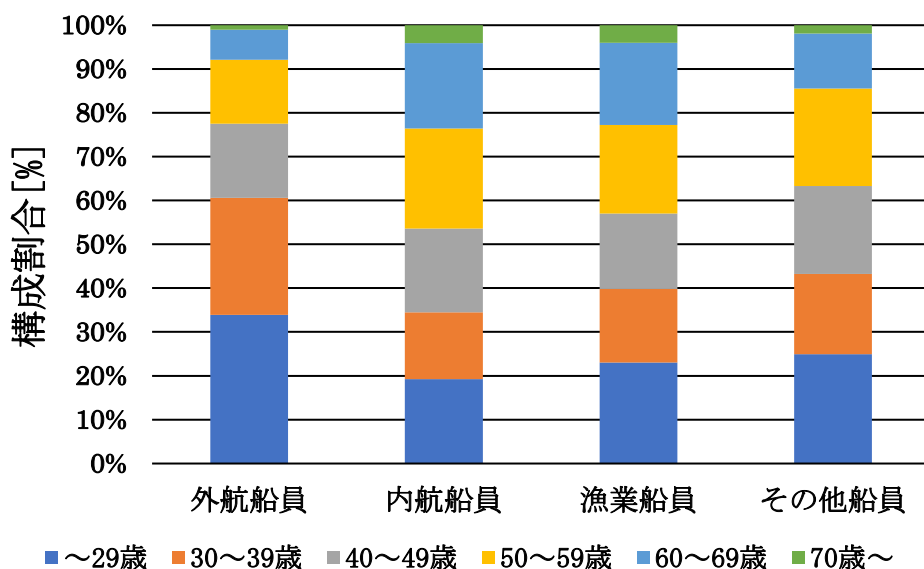


図 2.5.2 船員の分野別年齢構成比

2.6 船員不足問題の原因[16]

船員不足問題の原因は労働条件や労働環境などと考えられている。松尾俊彦氏は、内航海運における船員数の減少は、内航海運業界の構造問題が労働条件や労働環境を悪化させていることが原因であると述べている。その内航海運業界の構造問題とは内航二法の制定と、それによる業界のピラミッド構造である。1964年に内航海運業法および内航組合法が制定されたことにより、ある特定の荷主の下に、元請けオペレーター、2次・3次オペレーター、そして多数のオーナーというピラミッド構造が形成されてしまった。この影響が現在も残っており、需要と供給で運賃や用船料が決まるという市場が期待されず、船舶コストを定期用船料で賄えない状況になっている。その結果、オーナーの経営改善や船員の待遇改善が進まない環境になり、現在でも船員不足問題が改善されずに残る状況となっている。

2.7 課題に対する取り組み[17][18][19][20]

前述の通り現在、海難の原因の大部分がヒューマンエラーによるものである。加えて船員の高齢化、船員数の減少が進行すると、さらにヒューマンエラーの起こりやすい環境になり、結果として海難の発生数が増加する可能性も十分考えられる。これらの問題への対策として、自動運行船等の研究が盛んに行われている。Lars R. Hole 氏らは自動運行船”Offshore Sensing Sailbuoy”を利用し、平均風速 9.8m/s、最大風速 20.4m/s で風が吹く海域で、波浪測定をすることに成功した。記録された最大波高 12.6m であり、広範囲の海の状態でも自動運行船による波浪測定の可能性を示した。また、2019年の三好晋太郎氏らによる三井 E&S 造船における自律化船への取り組みでは、低速での操縦運動制御技術を有効に活用できる自動港内操船制御システムを実用化することを目的とし開発に取り組んでいると述べられており、その後 2021年5月には三井 E&S 造船株式会社らが共同提案した「船舶の自動離着岸の安全性に係る実証事業プロジェクト」に関し、大型カーフェリーとしては世界で初めて実岸壁での自動離着岸を成功させたと発表があった。このように船舶の自動運行化の技術は段階的に発展しており、自動運行船を導入することで、外洋上、沿岸部、港内、接岸・荷役時それぞれにおける労働環境や船員不足の改善、ヒューマンエラー起因海難事故防止などの効果が期待できるとされている。しかし実用化には技術面での発展も当然であるが、国内だけでなく世界規模で規制面の検討などが不可欠であるため、労働環境や船員不足問題の改善に至るのは当分先のことだと予想される。したがって、海難の減少には、やはりヒューマンファクターを抑制する対策が必要であると考えられる。

第3章 メンタルワークロード

3.1 メンタルワークロードの概要

近年、様々な業界で自動化や省人化の取り組みがなされている。菊池保乃加氏らは、自動車の自動運転に向けて、車々間・路車間の情報交換として用いられると想定されるアドホックネットワークの通信経路端末集合推定を行っている[21]。また、篠田岳思氏は、将来の自動化コンテナターミナルの初期計画の際の配置計画に必要な、ターミナルの機能性評価法や荷役シミュレーションモデルの構築を行っている。[22]これらの自動化や省人化への取り組みに伴い、作業主体が人間の肉体的作業から精神的作業に移りつつある。具体的には監視作業や操縦・運転作業、コンピュータを使用したデスクワークなどで、いずれも肉体的負担よりも精神的負担が大きい作業である。これらの作業では過度の緊張や長時間の緊張を余儀なくさせられ、これがヒューマンエラーや、作業者の身体的・社会的健康を阻害する要因となる。このような精神的作業による生体への負荷(Mental stress)、もしくは生体の負担(Mental strain)はメンタルワークロード(Mental workload)と呼ばれている。メンタルワークロードの測定法は主に①主観的測定(Subjective measures)、客観的測定である②パフォーマンスもしくは作業分析(Performance/task measures)と③生理・生化学的測定(Physiological/biochemical measures)の3つに分類される。主観的測定は比較的簡単に自分の主観的な負担度をスケール上に直接反映させるもので、他の測定法と併用されることが多い。主観的測定の代表的なものとして、SWAT(Subjective workload assessment technique)[23][24]やNASA-TLX(NASA task load index)[25]などが提案されている。パフォーマンスもしくは作業分析は二十課題法による副次課題の成績などから総体的に評価するものである。二十課題法とは、ある課題(主課題)のワークロードを、もう一つの課題(服次課題)の成績から推測する方法である[26]。生理・生理学的測定は生体情報から作業負担の意味でのメンタルワークロードを調べるもので、心拍数、血圧、呼吸、脳波、事象関連電位、瞳孔系など多種多様である[27]。

メンタルワークロードの測定法には様々な測定方法があるが、主観的方法と客観的方法のどちらも長所と短所が存在する。表3.1.1と表3.1.2にメンタルワークロードを調べる方法と各々の方法の特徴を示す[28]。主観的方法には被験者本人によって評価する方法と、被験者とは異なる他者が評価する方法がある。しかしどちらも機械では読み取ることができない要素を結果に反映させることができるという長所があるものの、評価者の個人差等によって回答が操作されやすいという短所があり、主観的方法のみでメンタルワークロードを正確に測定することは難しい。一方、客観的手法は行動的方法と生理的方法に分けられる。行動的方法は特別なセンサーなどの機器を必要とせず、客観的なデータを連続的に得ることができるという長所があるが、測定することができる被験者の行動が限定的であるという短所があり、船橋で様々な機器を操作しながら見張り作業等を行う操船者の継続的な測定には不向きであると考えられる。生理的方法は測定、分析及び解釈の際に特殊なセンサーやソフトが必要となり困難であるという短所があるものの、外見上ではとらえにくい被験者の反応を定量的なデータとして測定が可能でという長所がある。生理的反応を測定する方法は被験者のメンタルワークロードを連続的に測定することが可能であり、多くの分野で利用されている。茅原崇徳氏らによる研究では自動車の運転者のメンタルワークロードを、眼球運動関連パラメータを特徴量としたOCSVM(One class support vector machine)で定量化している[29]。また芳賀繁氏は、混雑海域における操船者のメンタルワークロードを心電と呼吸により計測し

ている[30]。本研究でも船橋内における操船者のメンタルワークロードを、行動を制限することなく連続的に測定したいため客観的手法、中でも生理的方法に着目して研究を行った。

表 3.1.1 メンタルワークロードの主観的評価手法

	主観的手法	
	本人による評価	他者による評価
方法	被験者に自分の行動や心理状態ある間点に基づいて評価させる。(例：疲労チェック、自覚症状等)	第三者に被験者の行動をある観点に基づいて評価してもらう
長所	外見から知ることが難しい内面的な変化を知ることができる	機械では測定できない要素を評価することができる
短所	個人差や時間による変化の影響を受けるなど本人が回答を操作できる	観察者の個人差や時間の変化の影響を受ける

表 3.1.2 メンタルワークロードの客観的評価手法

	客観的方法		
	行動的方法	生理的方法	
方法	ある条件での被験者の作業性能を観察または測定する。(例：機器の操作作業)	ある条件における被験者の作業中の生理的反応を測定する。(例：心電図・脳波等)	ある条件での被験者の精神的機能を測定する。(例：二重課題)
長所	客観的なデータを連続的に得ることができる	外見上ではとらえにくい反応を客観的で定量的なデータとして連続的に測定が可能である	外見上ではとらえにくい反応を客観的に定量的なデータとして測定が可能である
短所	対象が被験者の外見上の行動に限定される	測定、分析及び解釈が困難である	連続的に計測することが困難である

3.2 メンタルワークロードの測定方法

① NASA-TLX (NASA task load index) [31][32]

NASA-TLX は最もよく用いられている主観的メンタルワークロード評価手法である。表 3.2.1 に示すような 6 項目について「低いー高い」または「良いー悪い」を両極とする Graphical scale を用いて 1~100 点で評価点を得て、その平均値を算出するものである。平均値は、一対比較を用いた重み付け係数による平均値を用いるのが基本的な方法である。しかし、AWWL、CSTLX という一対比較を用いずに、重み付け平均値を算出する簡便法も 2 つ提案されている。この重み付け平均値の算出は NASA-TLX の主な特徴だが、VAS (Visual Analog Scale) による評定も特徴の 1 つといえる。量的尺度を求める主観評価では Likert スケールと呼ばれる何段階かの評定尺度法が用いられるのが一般的であるが NASA-TLX では VAS が用いられている。評定尺度では離散数値しか得られないのに対し、VAS では、より連続量に近い値が得られることで分解能を上げることができる。またこの NASA-TLX が多く用いられる理由としては、評価値に感度の良さにある。これ

は難易度別にいくつかの作業があった時に、作業に対する評価値が難易度と相関を示すということである。

松本崇裕氏らによる研究では、人の会話負荷を NASA-TLX を二重課題法と併用することで計測している。ヒューマンロボットインタラクション分野において、人との対話に複数ロボットを用いると一貫性や親密性が増すなど多くの利点があることが報告されている。しかしロボットが 1 台の場合と 2 台の場合において高齢者にとってどちらが好ましいか、ロボットと高齢者の対話トライアルにより検証したところ、ロボットが 1 台の条件が優位に高い評価となった。対話においては位置関係がコミュニケーションに大きな影響を与えることも知られており、複数人で対話をしている時、他者を視認するために顔方向の切り替えが必要な人は、顔方向の切り替えを必要としない人と比べて対話の負荷が大きくなると仮説を立てることができた。つまり、対話をする他者が全員視野の内にいるほど対話の負荷は少ないと考えた。この仮説検証のため複数ロボット対話システムを使用した実験を行い、被験者が 2 台のロボットを同時に視認可能な条件と同時に視認不可能な条件の 2 つの位置関係における対話負荷を主観・客観の 2 つの側面で測定するために NASA-TLX と二重課題法を用いた。その結果、両手法で視覚内条件と比べて視覚外条件の方が、負荷が大きかったという結果が得られた。

表 3.2.1 NASA-TLX 下位尺度の定義

項目	端点	説明
精神的要求	低い/高い	どの程度、精神的かつ知覚的活動が要求されましたか？作業は容易でしたか、それとも困難でしたか。単純でしたか、それとも複雑でしたか。苛酷でしたか、それとも寛大でしたか。
身体的要求	低い/高い	どの程度、身体的活動が必要でしたか？作業は容易でしたか、それとも困難でしたか。ゆっくりしていましたが、それともきびきびしていましたが。ゆるやかでしたか、それとも努力を要するものでしたか。落ち着いたものでしたか、それとも骨の折れるものでしたか。
時間切迫感	低い/高い	作業や要求作業の頻度や速さにどの程度、時間的圧迫感を感じましたか？作業ペースはゆっくりしていて暇でしたか、それとも急速で大変でしたか。
作業達成度	良い/悪い	実験者（または自分自身）によって設定された作業の達成目標の遂行について、どの程度成功したと思いますか？この目標達成における作業成績にどのくらい満足していますか？
努力	低い/高い	あなたの作業達成レベルに到達するのにどのくらい一生懸命（精神的および身体的に）作業を行わなければなりませんでしたか？
不満	低い/高い	作業中、どのくらい、不安、落胆、いらいら、ストレス、不快感、あるいは安心、喜び、満足、リラックス、自己満足を感じましたか？

② 心拍計測[33][34][35]

人間の緊張や興奮を示す生理反応には、交感神経と副交感神経からなる自律神経が関わる。呼吸循環機能の亢進や消化機能を抑制する交感神経は緊張状態で活発であり、一方エネルギーの保存、貯蔵に関わる副交感神経はリラックス時に活動することが知られており、自律神経によって心拍数は調整されている。そこで、心拍と自律神経の関係から人間の緊張や興奮状態を調べるためには、交感神経と副交感神経がどの程度働いているかが重要となる。つまり心電図の R-R 間隔（心拍の間隔）を計測することが有効である。R-R 波とは P、Q、R、S、T と名付けられた心電図成分の内、血液を左心室から大動脈に送り出す時に生じる波である。そして R-R 間隔とは R 波と次の R 波までの時間間隔を言う。（図 3.2.1）R 波の振幅はそれ以外より大きく、信号検出が容易である。

人間のメンタルワークロードを計測する方法として心拍、つまり R-R 間隔を計測する方法は比較的に被験者への負担が小さく、かつ応答の良い指標として着目されている。R-R 間隔変動の周波数成分（Low Frequency(LF) : 0.04-0.15Hz、High Frequency(HF) : 0.15-0.40Hz)を用いることで、村井康二氏らの *The Mental Workload of ship's Navigator using Heart Rate Variability* などで船橋における操船者の状況分析・判断・操船等（避航操船前、航路入口付近、航路航行中等の操船歓談を必要とする場合、チャートプロッタの海図交換やデスクワーク時、船体動揺時及び風が強く船体が流される場合）でその応答が確認されている。

また、心電図計により計測した R-R 間隔からスペクトル分析によって SNS(Sympathetic Nervous System)値を調べる方法がある。得られる SNS 値は一定の時間ごとの心的負担の平均値を示すものである。村井康二氏らによる実船操船とシミュレータ操船における操船者の目視領域と緊張度に関する基礎研究では、実船操船とシミュレータ操船における操船者の緊張度の比較に SNS 値を用いている。

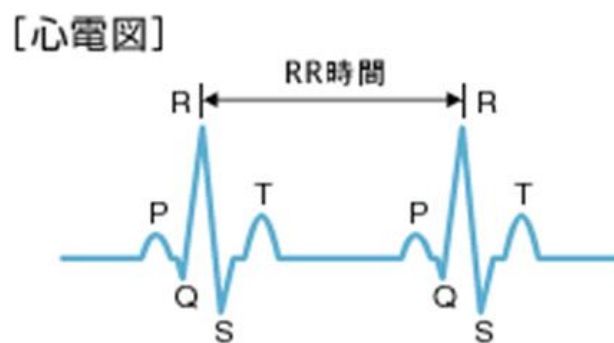


図 3.2.1 R-R 間隔の概要

③ 脳波計測[36][37][38][39]

メンタルワークロードの測定方法として主観的方法は、被験者の主観を忠実にとらえているかという点で限界がある。一方、客観的方法である生体情報を取得する測定方法は被験者の状態を直接的に把握できるだけでなく、内面に関する情報も取得できる。生体情報の中でも、脳波はその情報量の多さゆえに有用な生体情報として注目を集めている。

人間の脳は、様々な周波数からなる電気の振動を常に発しており、それらは周波数帯域ごとに名前がつけられ、それぞれ異なった生理学的な意義を有している。各周波数帯の名称と活発になる条件を表 3.2.2 に示す。5~8Hz 帯の θ 波は一般的にまどろみ時によく現出し、深いリラックス状態でも現れる。8~13Hz 帯の α 波は閉眼、安静、覚醒状態によく観察され、逆に精神活動時、緊張時には減少する。13~20Hz 帯の β 波は、精神活動時や緊張状態の時、多少のストレスがある時に優位になる脳波である。脳波計測装置は形、大きさなど様々であるが基本的には図 3.2.2 のような頭皮に電極が接触するように装着できるものである。図 3.2.2 の脳波計測装置は InteraXon 社製の Muse2 という製品であり、脳波の他にも心拍数や呼吸などもリアルタイムに測定することができるウェアラブルデバイスである、電極の配置は一般的には図 3.2.3 のような国際脳波学会が推奨する「10/20 法」に準じる 19 か所である。実際には検査や研究の目的によって使用する電極の数・位置が決まる。

しかし脳波において個人差は無視できず、特に脳波振幅の絶対値や α 波の現出具合には個人差が大きく、そのため解析結果にバラツキが生じる。そこで、感性スペクトル解析を用いることで個人差に影響され難い共通の特徴を取り出すことが可能となる。この感性スペクトル解析法とは、頭皮上の電位部位パターンを電極間相互関数係数という個人間の脳波振幅の大小による影響を受け難いパラメータで数値化し、学習アルゴリズムを用いて喜怒哀楽を取り出すものである。

佐藤季久恵氏らによる研究では、脳波計測を利用して被験者の感性の状態を把握している。場の雰囲気というものを人為的にデザインする場合、視覚情報（家具、調度品、壁紙）と聴覚情報（BGM）をコントロールすることが重要である。BGM には感情誘導効果やイメージ誘導効果があるとされており、小さな労力で場の雰囲気に合わせることができる。そこで佐藤季久恵氏らは、店舗の雰囲気に適した BGM を推薦するシステムの構築を目指した。場の雰囲気から想起する人間の喜びや悲しみ、怒り（ストレス）、落ち着きなどの感性は直接測定できない場合が多く、従来のアンケートやインタビューを用いた方法では被験者の顕在意識に影響を受ける可能性がある。そこで脳波測定を利用することとした。実験では VR 空間上で様々な場面を用意し、1 場面毎に BGM として用いられると想定されるピアノ曲やジャズ、クラシック、ヒーリングなどの曲を流し、その際の被験者の脳波を測定した。実験の結果、場面に限らずクラシックはリラックス効果が高くなる、レストランで洋楽を聞いた時はリラックス値が大幅に低い数値となるなどの結果が得られた。

表 3.2.2 脳波の周波数帯による生理学的意義

周波数	名称	活発になる条件
5~8	θ 波	まどろみ時、リラックス時
8~13	α 波	安静時、覚醒状態時
13~20	β 波	緊張状態、ストレスのある時

⑤



図 3.2.2 脳波計デバイス muse2

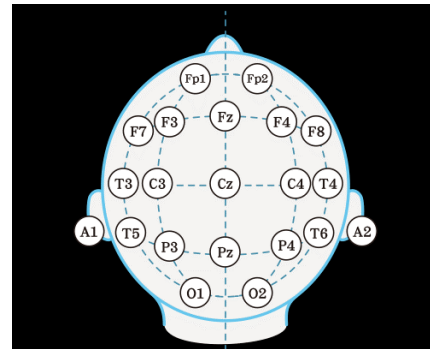


図 3.2.3 「10/20 法」による電極配置

④ 顔面皮膚温度（鼻部皮膚温度）[40][41][42][43]

現在主流のストレス評価システムは、心電波と脈拍を測定・解析することでストレスを総合的に評価するものや唾液や血液から評価するものである。しかしこれらの手法はセンサーを被験者に身に付けてもらう必要があり、ストレス評価自体がストレスャーとなってしまうという問題点や、リアルタイムな測定が困難であるという問題点がある。このような問題点を解決する方法として顔面皮膚温、特に鼻部皮膚温度の計測によるストレス評価手法がある。

一次的な激しい感情の動きで、自律神経系や内分泌系などの身体的変化を伴うものを情動といい、情動を引き起こす因子を情動ストレスと呼ぶ。この情動ストレスに応じた生体反応が全身に出現する。特に、血液量は、交感神経系、副交感神経系の血管収縮作用を中心とした自律神経系活動により変化が生じる。

鼻部周辺には、毛細血管の血液量を調整する動静脈吻合血管（AVA：Arteriovenous anastomoses）と呼ばれる動脈と静脈の吻合部（抹消皮膚血管）が集中し、他の体部位と比較して多い。さらに、血管が他の部位では脂肪層の下を走っているのに対し、鼻部周辺においては、皮膚と鼻骨のわずかな隙間を走っている。皮膚温度は血液量の変化に依存する為、情動ストレスによる心理状態が鼻部皮膚温度に顕著に現れる。

鼻部皮膚温は、快状態推移時において、副交感神経の作用により AVA を通る血液量が調整され、その温度が上昇する。同様に不快状態推移時においては、交感神経の作用により温度が下降する。

浅野裕俊氏は、この顔面皮膚温の特徴を自動車ドライバーの一過性覚醒度低下の定量化計測技術の開発に利用している。自動車事故において約 3 割は漫然運転等の不注意型の事故である。この理由として主に長時間運転による覚醒度低下が原因と言われている。そのためドライバーの生理心理状態を客観的かつ定量的に把握することが重要な課題となっている。ドライバーの覚醒度低下検出手法として車両情報を用いる方法と生体

情報を用いる方法がある。生体情報の測定はリアルタイムの測定に優れ、かつ客観的で定量的な測定を行うことが可能であり、また無意識下の反応も検出することができる。また生体情報の測定の方法にも様々な方法があるが、低拘束・無侵襲・非接触・無意識計測な方法である顔面熱画像を利用した。そして顔面皮膚温度の時間空間変動パターンに基づく覚醒度推定モデルの構築を試みた。具体的には、顔面熱画像および一般生理指標である心拍、客観的指標である顔表情評価値を測定し、本モデルを用いて顔面皮膚温度変化から客観的指標である顔表情評価値を推定した。そして実験の結果、顔表情評価値 1～3 段階において推定できる可能性を示した。

また前額皮膚温度は鼻部皮膚温度のような影響を受けにくく温度変化が少ないといわれている。林祐司氏らはこの両者の特性を心的負荷の定量評価に適用し操船者の心的負荷を定量化している。

3.3 メンタルワークロードとヒューマンエラー

① ヒューマンエラーの概要[44]

心理学者のジェームズ・リーズンはヒューマンエラーを「計画されて実行された一連の人間の精神的・身体的活動が意図した結果に至らなかったもので、その失敗が他の偶発的事象の介在に原因するものでないすべての場合」と定義している。また、もう一つの定義ではヒューマンエラーを「システムの目標に対して、許容範囲のある範囲を超えた人間の行動・行為あるいは処置」とであるとされている。ヒューマンエラーは、基本的には人間側のエラー（間違い）に起因することが多いが、エラーを引き起こしている要因は他に存在していると考えられる。従って、ヒューマンエラーを防止するためには、人間側の問題となる部分の指導や管理を強化するだけではなく、誘発原因となる因子を取り除くことも重要である。

ヒューマンエラーの発生比率は、作業条件や作業環境に大きく依存する。予測のできない事態やそれに近い状況下で人間がとり得る行動は、通常の業務では無理なく処理できていたことが、突然ヒューマンエラーという形で発生する確率が非常に高まることになる。これは通常と同じ行動プロセスで仕事の実行できない場合など、短期記憶などの処理資源が仕事を進めるために十分に機能しなくなったことが考えられる。また、個人差はあるが、強いストレスがヒューマンエラーの発生率を高めることもある。一般的には、ベテランより初心者の方がストレスの影響を受けやすいと言われている。しかしベテランと呼ばれている人は、稀に考えられないほど大きな事故を引き起こすことがある。この原因は作業に慣れることで、不注意により錯誤が増えるためである。

錯誤行為は、日常の中に頻繁に見られる無意識の表れの一つで、言い違い・書き違い・読み違い・聞き違い・見間違い・取り違い・思い違い・思い込みなどが挙げられる、人間が意図せずに行ってしまうエラーである。フロイトは、錯誤行為の起こる条件として以下の3つがあると述べている。

- (1) その人に不快感・疲労感がある時
- (2) その人が逆上しているような興奮状態の時
- (3) その人の注意が他のことに強く向けられている時

ベテランと呼ばれる人たちは作業手順や作業行動を自分なりにパターン化していることが多く、様々な情報を得た瞬間にスムーズに処理することができる。つまり、無意識に色々な作業をすることになり、錯誤により作業員自身が想定していない行動をしてしまう危険がある。「不注意」になる、「思い込み」を起こす、また「故意の違反」が多いという3つがベテランと呼ばれる人たちのエラーの特徴である。一方、初心者のエラーの特徴としては以下のようなものが考えられる。

- (1) 知覚情報の適切な取捨選択ができないために、情報の優先順位の判断ができず、何が重要で、何を優先すべきかの選択が上手くできない
- (2) 経験が不足しているために、長期記憶との照合が上手くできない
- (3) 適時の判断ができないために、事態がどんどん先に進行してしまう
- (4) 自分がとるべき行動パターンが確立していないために、スムーズな行動がとれず、対処が後手に回り、今までできていた操作を一瞬にして忘れてたり、焦る気持ちが先

行して不安全行動に陥ってしまう

また、ヒューマンエラーの背後要因は、次のような要因に分類できる。

- (1) 内的要因：体調、気分、意欲、不安、心配事など
- (2) 作業環境要因：作業環境、作業条件、作業場での人間関係など
- (3) 時間的要因：作業時間、残業時間など

体調や気分の良し悪しや、本人の作業に対するモチベーションが低い場合や不安や心配事を持っている場合、作業に集中できないことがあり、つい不安全行動に陥ってしまいがちである。また、暑い・寒いといった物理的環境条件や長時間の作業などで集中度や覚醒水準が低下することが分かっている。

② メンタルワークロードが背後要因と考えられる事故事例（JR 福知山線脱線事故）[45]

メンタルワークロードが原因となったといわれる重大事故の一つに JR 福知山線脱線事故がある。昔は鉄道に関連した死亡事故が毎日続くといわれるほどだったが、現在は他の交通機関を比較しても極めて安全な輸送機関へと進歩している。しかし、それでも 100%鉄道の事故が無くなることはない。2005 年に発生した JR 西日本福知山線脱線事故は、死亡者 100 名を超す大事故となってしまった。事故の概要は、7 両編成の列車が時速 70 キロ以下の制限箇所である右カーブに時速 116 キロで進入し、前 5 両が脱線した事故である。国土交通省航空鉄道事故調査委員会の詳細な調査によれば、列車、線路など事故原因としての物理的な要因はほぼ否定されている。つまりこの事故は何らかのヒューマンファクターによる事故だと考えられる。

JR 福知山線脱線事故の原因として、まず居眠り運転が考えられる。実際に JR 西日本が把握している 2001～2006 年までの眠気によるオーバーランは 12 件も発生している。しかし今回の脱線事故時にはブレーキをかけた記録などから居眠りが原因である可能性はかなり低い。また運転士は 23 歳で、運転士歴 11 か月ではあるが学科試験や技能試験等の記録を見る限り平均的な運転士であり、健康上の異常も認められなかった。

そのため、今回の事故の原因は心理的負担を感じたことによるものだと考えられている。事故発生時、運転士が心理的負担を感じる原因はいくつかあった。1 つ目は、脱線事故の直前の停車駅にて 70 メートルのオーバーランをしたことである。このオーバーランはかなりの距離であり、運転ミスをした運転士に課せられる「日勤教育」という研修を科されることが予想されるものだった。運転士は過去に「日勤教育」を科せられた経験があり、友人に辛かったと語っており、再度「日勤教育」を科されることへの不安があったと思われる。2 つ目は指令所とのやり取りである。運転士は「日勤教育」を避けるため車掌に、指令所への報告では虚偽の報告をしてほしいと頼んでいた。そして車掌オーバーランの後すぐに指令に虚偽報告をしたが、その際には報告内容が上手く聞き取られず指令から再確認されることがあった。このことから、車掌が虚偽報告をしてくれるのかという不安、報告が虚偽であると疑われているのではないかという不安などが運転士にはあったと考えられる。3 つ目は列車の遅れである。JR 西日本のアンケートによると列車が 3 分以上遅れた場合と 1 分以下の小さな遅れの場合は、運転士はあまり心理的負担を感じない。逆に 1 分以上 3 分以内の遅れでは最も心理的負担を感じると結果が出ている。当時、列車はオーバーランをした関係で約 1 分半の遅れが生じていた。運転士は、この遅れを少しでも取り戻そうと考えていたと思われる。

これらの原因により運転士は心理的負担を感じながら作業に従事していた。そして、車掌と指令所の通信が気になっていたがためにカーブに侵入する際のブレーキが遅れた。また、緊急ブレーキの使用に慣れていなかったためか、事態を少しでも穏便に済ませるために緊急ブレーキの使用にためらいがあったのか、ブレーキ操作も緊急ブレーキではなく段階的なブレーキの使用であったため、最終的に大惨事を引き起ってしまったと考えられる。

③ 海難におけるメンタルワークロードの影響[46][47]

田久保宜晃氏は交通事故データによる運転者のヒューマンエラーと心的負荷の一考察で、自動車等（四輪車、二輪車、特殊車両等）の運転者におけるヒューマンエラーの発生傾向に影響する要因を分析している。この研究における自動車等の運転者の人的要因別の事故件数を表 3.3.1 に示す。死傷事故では大区分の「発生の遅れ」（73.8%）で特に構成率が高く、次いで「判断の誤り等」（18.0%）で、「操作上の誤り」（8.0%）の構成率は低い。死亡事故でも、大区分の構成率の順序は変わらないが、「発見の遅れ」（63.1%）が死傷事故の構成率（73.8%）よりも低く、「判断の遅れ」がほぼ同率で、「操作上の誤り」（15.7%）が死傷事故の2倍となっている。このような大区分として挙げられている「発見の遅れ」、「判断の誤り等」、「操作上の誤り」を、第2章の図 2.4.1 に示す海難の原因と比較すると、「発見の遅れ」は「見張り不十分」、「判断の誤り等」及び「操作上の誤り」は「操船不適切」に該当すると考えられる。このように考えると、海難の原因においても見張り不十分、操船不適切がヒューマンエラーの多くの割合を示しており、自動車等の交通事故と海難の背後要因は、非常に似ているということが分かる。

また、事故の当事者の種類（自動車の種別、運転者の年齢）、発生する状況（道路種別、昼夜）、事故類型の3種類の要因を分析したところ、結果は相互に関連が認められるものであり、田久保宜晃氏はその関連を図 3.3.1 のようにまとめている。このようにヒューマンエラーを発生させる心的負荷は、交通状況の複雑さと車両の操作性に対する運転者の情報処理能力の相対的關係で決まり、仮に心的負荷が過大となればエラーが発生すると考えられる。ここで船舶運航におけるヒューマンエラーを発生させる過程に置き換えたものを図 3.3.2 に示す。図 3.3.2 に示した過程を経て、操船者の心的負荷が過大となった時にヒューマンエラー（操船者のエラー）が発生すると考えることができる。

表 3.3.1 自動車等の運転者の人的要因別事故件数（平成 15 年）

大区分	人的要因		死亡事故		死傷事故		死亡事故率 [%]
	中区分		件数	%	件数	%	
発見の遅れ	前方不注意	内在的要因	1361	19.9	77343	8.6	1.8
		外材的要因	1328	19.4	180405	20.0	0.7
	安全不確認		1627	23.8	406825	45.2	0.4
	小計		4316	63.1	664573	73.8	0.6
判断の誤り等	動静不注意		360	5.3	111507	12.4	0.3
	予測不適		498	7.3	30878	3.4	1.6
	交通環境		367	5.4	19833	2.2	1.9
	小計		1225	17.9	162218	18.0	0.8
操作上の誤り			1071	15.7	72040	8.0	1.5
不明			227	3.3	1130	0.1	20.1
合計			6839	100.0	899961	100.0	0.8

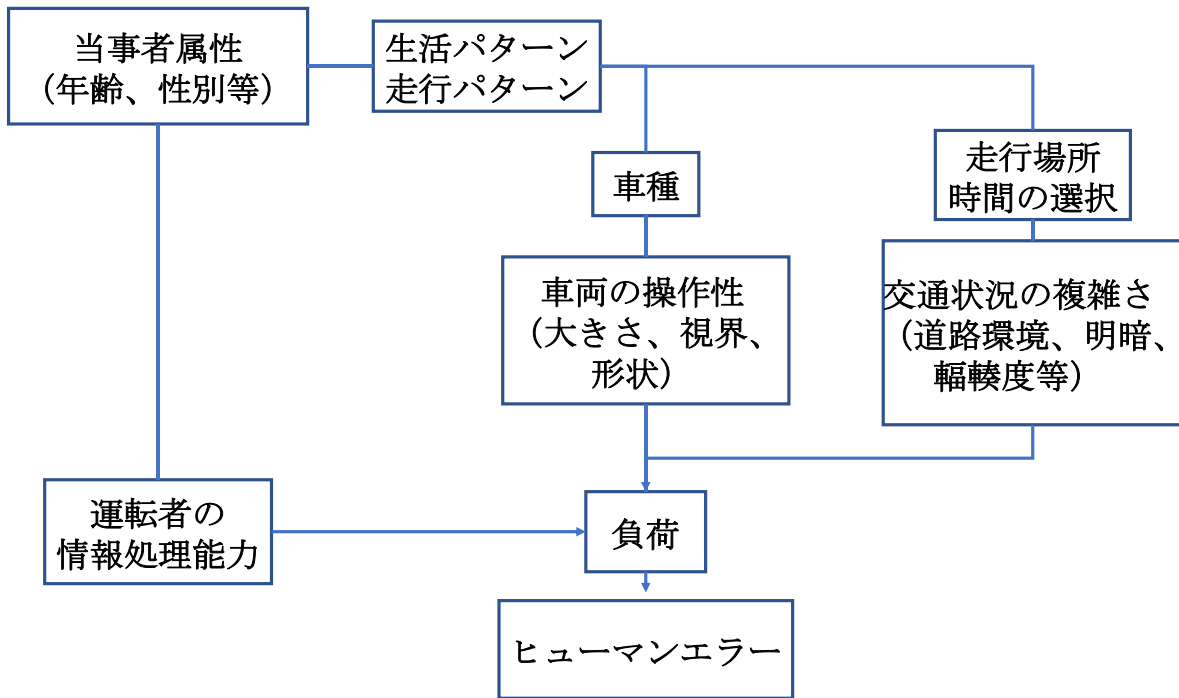


図 3.3.1 事故の傾向に影響する要因間の関連（自動車事故）

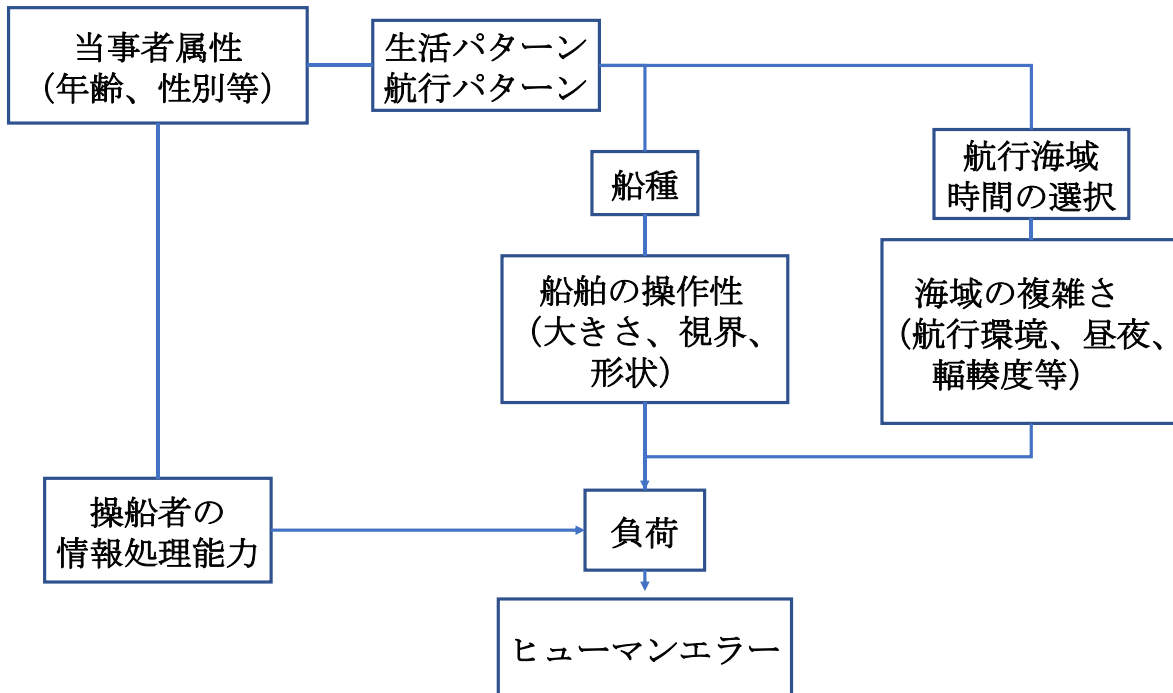


図 3.3.2 事故の傾向に影響する要因間の関連（船舶事故）

このように様々な過程を経て心的負荷が過大となることでヒューマンエラーが発生しやすくなることが報告されているが、逆に心的負荷が全くかからない状態でもヒューマンエラーが発生する可能性がある。

水難救助活動においては、事故防止のためには監視による事故の早期発見が重要であるとされている。重大事故に至ったケースでは早期発見ができなかったという報告が約9割にもものぼる。事故防止のために人材育成に資金や労力を費やされるようになったが、即効性のある対応がなかなか期待できない。それは覚醒水準の低下によって生じる眠気や疲労など、心身の状態不良からくる「見落とし」や「うっかりミス」というようなヒューマンエラーが多いためである。これに対し、一般的な休息では安静にすることで心身疲労回復に努める場合が多いが、監視作業やVDT (Visual Display Terminal) 作業のように動きの少ない作業では、安静よりも軽いジョギング程度の動的な運動をする方が、作業者の心身の疲労回復だけでなく作業成績の向上にも有効であると言われている。

福知山線脱線事故について前述した通り、事故原因として最初に疑われたものは、運転手の居眠り運転である。この事故では運転手の居眠りは発生していなかったと考えられているが、2001～2006年の間で居眠りによるオーバーランがJR西日本内で、最低でも12件発生していることは事実である。また、第2章の図2.4.1で示すように海難の原因のうち居眠り運航は全体の3%を占めている。また、海難の原因として見張り不十分や操船不適切、気象海象不注意なども高い割合を占めているが、これらも操船者の覚醒度低下による眠気や疲労など、心身の状態不良がその背後要因である可能性がある。

中塚健太郎らは覚醒水準、疲労等の指標を用いて、水難救助活動を想定した監視シミュレーション課題における、休息時に行う行動の効果を比較検討している。覚醒水準の測定について、主観的眠気は5段階の自己評定尺度、心理的覚醒水準は覚醒水準を二次元で測定できるTDMS (Two Dimensional Mood State) という手法、生理的覚醒水準は非接触型皮膚赤外線温度計により抹消皮膚 (左手中指の中節) を測定する方法を用いている。疲労の測定について、主観的疲労は11段階の自己評定尺度、局所的な身体疲労は5段階の自己評定尺度、生理的疲労は臨界融合度 (CFF) を用いている。結果、休息時には安静より軽運動、計運動の中でも動的運動が覚醒水準 (眠気) の回復や身体的な疲労回復にも効果的であるという結果が得られた。

第4章 鼻部皮膚温度の自動計測方法

4.1 鼻部皮膚温度の自動計測に用いるセンサー

(1) 汎用モーションセンサー(Kinect)

① Kinect の概要[48]

Kinect は Xbox360 用のゲームコントローラとして 2010 年末にマイクロソフトから販売された入力センサーデバイスである。Kinect を使うことでプレイヤーは手にコントローラを持つことなく、身振りや手振り、声等を使うことでゲームを操作することができる。このように本来はゲーム用のコントローラであるが、Windows PC に接続して NUI(Natural User Interface)用の入力デバイスとして使える Kinect for Windows センサーとして Kinect v1 が販売され、それに対応した SDK も用意された。このように低価格でありながら、USB ケーブルを使いコンピュータに接続するだけで、Kinect から得られた様々なデータの使用や、モーションキャプチャデバイスとして利用したアプリケーションを手軽に作ることもできるため、ゲーム開発とは関係のない分野でも注目されている。またその後、Kinect v1 よりも深度センサーやカラーセンサー、近赤外線センサーなどのセンサーの精度が増した Kinect v2 が、それに対応した SDK と共に発売された。本研究ではこの Kinect v2 を使用した。また、2020 年 3 月より新型の Azure Kinect が日本でも販売が開始された。Azure Kinect DK には高度な AI センサーが搭載されており、これからさらに幅広い分野での利用が期待されている。



図 4.1.1 Kinect v2

② Kinect v2 の特徴[35][36][37]

Kinect v2 と Kinect v1 の相違点について説明する。まず、Kinect センサー自体の大きさや、搭載されているセンサーの種類等には大きな差はない。表 4.1.1 に Kinect v1 と Kinect v2 の主な動作使用を示す。搭載されている RGB カメラや 3D DEPTH SENSOR の違いとしては解像度、画角共に Kinect v2 では Kinect v1 から向上している。Kinect 自体の性能としては人の検出に関してはどちらも最大 6 人と変わらないが、人の骨格検出は 2 人から 6 人に、また検出骨格数も一人当たり 20 点だったものが 25 点に大幅に増加していることが分かる。Kinect v1 と Kinect v2 で検出できる骨格の具体的な位置を図 4.1.2、図 4.1.3 に示す。Kinect v2 において増加した点は首 (NECK)、指先 (HAND_TIP_LEFT、HAND_TIP_RIGHT)、親指 (THUMB_LEFT、THUMB_RIGHT) の 5 か所である。これにより「首をかしげる」や「(手首から先の)手を振る」などの感情や意思を表す際に頻度の高い動作を感知できるようになった。また、顔のパーツの座標、向き等を取得できるのは Kinect v1 と変わらないが、それに加えて人の顔 (表情) から情報を得て、その人の状態を推測することが可能となった。具体的には「Happy」、「Engaged」、「Wearing glasses」、「Left Eye Closed」、「Right Eye Closed」、「Mouth Open」、「Mouth Moved」、「Looking away」、「Face Yaw」、「Face Pitch」、「Face Roll」があり図 4.1.4 のようにそれぞれの項目に対し Yes か No、もしくは具体的な数値として現れる。

Kinect v1 は複数のアプリケーションが同時に同じセンサーに接続することができなかった。しかし Kinect v2 では「Kinect Service」を介入することで、複数のアプリケーションが同時に同じセンサーから取得することができる。

Kinect v1 と Kinect v2 の動作要件を表 4.1.2 に示す。Kinect v1 は Windows7 以降で動作したが、Kinect v2 は Windows8 以降で動作する。それに合わせて Visual Studio も 2012 年以降のバージョンが要求されている。

表 4.1.1 Kinect v1 と Kinect v2 の主な動作仕様の比較

	Kinect v2	Kinect v1
Color 画像[px]	1920×1080	640×480 1280×960
Color フレームレート[fps]	30 15(暗所)	30 12(暗所)
Depth 画像[px]	512×424	80×69 320×240 640×480
Depth フレームレート[fps]	30	30
Depth センシング方式	ToF(Time of Flight)	Light Coding
Depth 認識範囲[mm]	500~8000	800~4000(Default) 400~3500(Near) 400~10000(Extend)
水平視野角	70 度	57 度
垂直視野角	60 度	43 度 (±27 度 : チルトモーター)
人の検出	6 人	6 人
人の検出距離範囲[mm]	500~4500	800~4000(Default) 400~3500(Near)
人の骨格検出	6 人	2 人
検出骨格数	25 点/1 人	20 点/1 人
手指検出	△(親指と指先)	×
手のポーズ検出	○(グー、チョキ、パー)	△(Kinect Interaction : グー、パー)
ジェスチャー	○	△(Kinect Interaction : 入力支援)
マイク	4 つのマイク(マイクアレイ)	4 つのマイク(マイクアレイ)
音声入力	○	○
チルトモーター	無し	あり
加速度センサー	あり(APIとしては未公開)	あり
USB バージョン	USB3.0	USB2.0
1PC で複数 Kinect の同時利用	1 台	4 台まで
1PC で複数アプリからの同時利用	○	×
仮想マシンでの操作	×	○

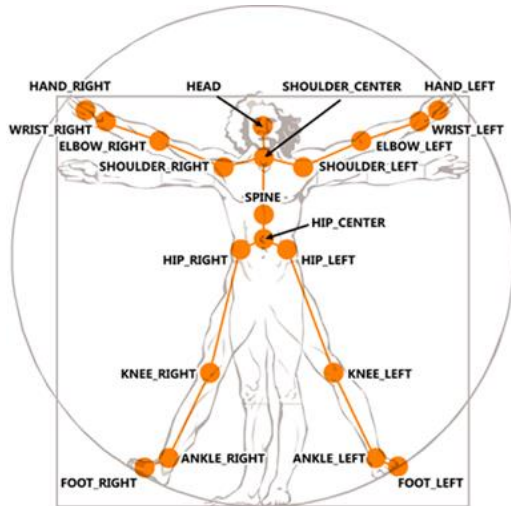


図 4.1.2 Kinect v1 の関節取得可能点

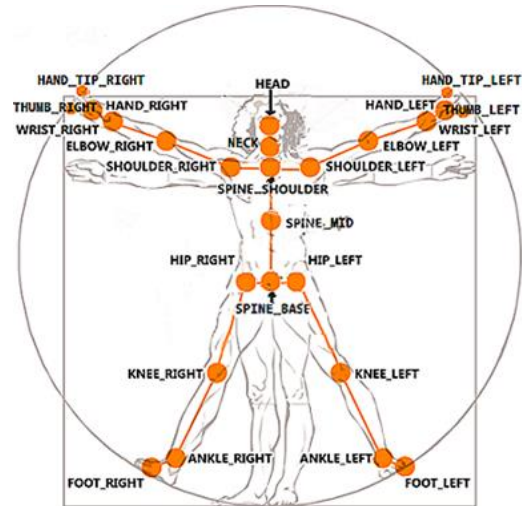


図 4.1.3 Kinect v2 の関節取得可能点



図 4.1.4 Kinect v2 が読み取る顔の情報

表 4.1.2 Kinect v1 と Kinect v2 の最小動作要件の比較

	Kinect v1	Kinect v2
OS	Windows 7 以降	Windows 8 以降
コンパイラ(Compiler)	Visual Studio 2010 以降	Visual Studio 2012 以降
接続端子(Connector)	USB 2.0	USB3.0
CPU	Dual-Core 2.66GHz	Intel Core i7 3.1GHz 以上
GPU	DirectX 9.0c	DirectX 11.0
RAM	2.0GB 以上	4.0GB 以上

③ Kinect の座標系[51][52]

Kinect v2 (以下 Kinect) には以下のように Body のカメラ座標系、Depth (赤外線、BodyIndex) の Depth 座標系、カラー画像のカラー座標系の 3 種類の座標系がある。これら 3 種類の座標系を相互に交換するため、全部で 6 種類の変換が存在する。それぞれの用途は表 4.1.4 に示す。

表 4.1.3 Kinect の 3 つの座標系

座標系	概要	ストリーム
カラー座標系	左上を原点とした 1920×1080 ピクセルの二次元座標	Color
Depth 座標系	左上を原点とした 512×424 ピクセルの二次元座標系	Depth
		Infrared
		Body Index
カメラ座標系	Kinect を原点としたメートル単位での三次元座標	Body

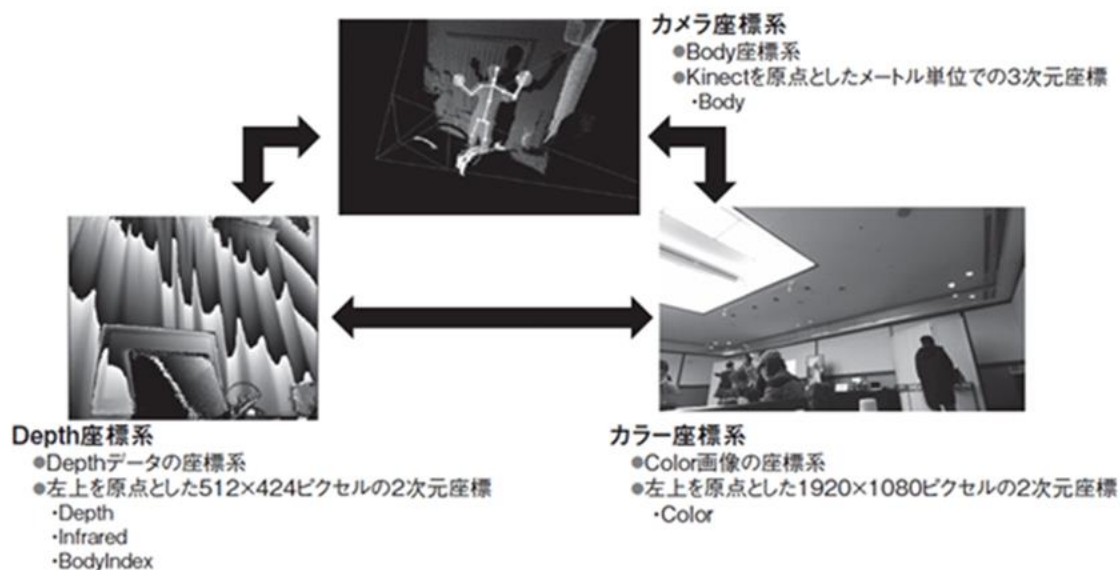


図 4.1.5 Kinect の 3 つの座標系

表 4.1.4 座標系の変換の各用途

変換前座標系	変換後座標系	主な用途
カラー座標系	Depth 座標系	Depth の解像度でカラー画像と Depth や Body Index をマッピングする
Depth 座標系	カラー座標系	カラー画像の解像度でカラー画像と Depth や Body Index をマッピングする
カメラ座標系	カラー座標系	関節座標をカラー画像にマッピングする
カメラ座標系	Depth 座標系	関節座標を Depth データにマッピングする
カラー座標系	カメラ座標系	点群のカラーデータとして利用する
Depth 座標系	カメラ座標系	点群の X,Y,Z データとして利用する

④ 顔認識の仕組み[52][53][54]

顔認識は生体認証に含まれており、AI(Artificial Intelligence)によりカメラで撮影した画像の中から人間の顔を検出し、目、鼻、口、輪郭等様々な特徴点を識別することで対象人物の年齢や性別、表情等を識別するシステムであり、とても身近なものとなってきている。具体的にはデジタルカメラなどでは自動で人物の顔にピント調節する機能などに利用されている。また最近では、赤外線センサーと組み合わせることで人物の体温を非接触に取得できるものが新型コロナウイルス感染症の対策として広く使われている。これらの顔認識は、一般的には各システムで記憶している人物の顔の情報と、撮影した画像内を比較することで顔を認識している。また、類似のシステムとして顔認証システムがある。これは検出した顔を、前もって登録した顔情報と比較することで個人を特定することができるシステムである。このシステムは顔認証に加えて、さらに詳細な顔情報を使用しており、より高度なシステムといえる。顔認証システムも身近なところで利用されており、空港の入国手続きやスマートフォンのロック解除機能などに使用されている。Kinect による顔認識、関節取得もこれらと同様の仕組みを使用していると予想できる。

また、Kinect には顔認識のための Face Tracking SDK が搭載されていて、画面からの顔の検出、顔の追跡、顔の部位各店の座標の取得、顔の向き取得、表情の取得、顔の 3D モデルの取得が可能となっている。

⑤ Kinect で得られる顔情報

I. 顔の各部位の座標データ

Kinect は顔認識した際に、認識した顔のなかから両目、鼻、口の両端の位置を認識し左上を原点とした 1920×1080 ピクセルのカラー座標系における X,Y 座標のデータをそれぞれの部位毎に取得することができる。本研究では SDK Browser(Kinect for Windows)v2.0 の Face Basic-D2D のサンプルプログラムをベースとして Kinect が顔を認識するたびにデータ取得年月日、データ取得時刻、両目、鼻、口の両端の座標、両目と鼻の座標から計算した額の座標、顔の傾きの情報を csv ファイルに書き込むようにプログラムを書き加え使用した。表 4.1.5 はこのプログラムを使用し顔認識した際のデータの一例である。表 4.1.5 に示すとおり、Kinect はミリ秒単位でデータを取得しており、データ時間間隔は一定でないが、Kinect が安定して顔認識をしている時は、1 秒間に 15～25 回程度データを取得している。

表 4.1.5 Kinect の顔認識により取得したデータの一例

データ		サンプル1	サンプル2	サンプル3	サンプル4
時		12	12	12	12
分		24	24	24	24
秒		26	26	26	26
ミリ秒		12	595	622	653
右目	X 座標	923.132	927.545	925.112	922.75
	Y 座標	672.532	673.139	673.791	671.751
左目	X 座標	969.477	969.54	970.54	970.374
	Y 座標	674.884	676.269	675.916	675.938
鼻	X 座標	943.039	948.243	947.196	943.561
	Y 座標	704.486	691.169	697.497	702.383
右口角	X 座標	926.989	929.288	927.968	927.205
	Y 座標	721.512	709.212	718.975	718.849
左口角	X 座標	9964.88	962.35	963.517	965.29
	Y 座標	721.982	712.778	720.987	722.575
額	X 座標	947.481	950.108	948.889	948.655
	Y 座標	650.536	653.707	62.139	650.033
FaceBox0		733	736	736	736
FaceBox1		901	901	901	901
FaceBox2		644	647	647	647
FaceBox3		989	989	989	989
FaceRotation0		0.957533	0.961185	0.954391	0.952194
FaceRotation1		-0.28051	-0.27338	-0.29183	-0.29757
FaceRotation2		0.066669	0.034813	0.069117	0.069117
FaceRotation3		0.001415	-0.01318	-0.00654	-0.00071

本研究では、この顔の各部位の座標データの中でも鼻の座標が取得できている割合を”Kinect 成功率”としてデータの検証の際に 1 つの指標として扱った。

II. 顔認識情報を付加した可視画像

上記の Kinect の Face Basic-D2D のプログラムを動かすとリアルタイムの動画を表示することができ、Kinect が顔認識をするとその動画上に Kinect の顔認識情報を付加した動画として映し出される。この動画をフリーの画面キャプチャソフトである Winshot を使用して保存した。キャプチャ間隔は 1 秒に 1 枚とし、jpeg 画像（以下 cap 画像）として保存した。図 4.1.6 は今回の実験で実際に取得した cap 画像の一例である。

本研究では、一回の実験の中で取得した cap 画像の内、Kinect による顔認識情報、その中でも鼻の認識情報が正しく映し出されている割合を”cap 成功率”として定義した。Kinect の顔認識が成功している場合でも、動画上に画像としては付加されていない場合がある。このような状況は Kinect の顔認識が不安定な場合に多く発生した。そのため”cap 成功率”を Kinect が安定して顔認識できているかの指標としてデータ検証の際に活用することとした。



図 4.1.6 Winshot により取得した顔認識情報を付加した可視画像の一例

⑥ Kinect の実験での使用例

I. 深度センサー、人骨格推定機能の利用例[55]

竹森史暁氏は「自動連結ロボットによる手動型車いすのための移動支援システム」で Kinect v2 を使用している。この研究では手動車いす利用者が移動補助を必要とするときにその要求を判別し、自動で車いすを認識および連結することで移動支援を実現する移動ロボットシステムを提案している。具体的には、移動補助を必要とするときの合図を挙手と設定していて、その挙手の判断に人骨格推定機能を利用している。また、深度センサーは車いすの位置、姿勢の推定の際に、車いす付近の等高度データを取得することに利用されている。

II. 顔認識機能の使用例[56]

佐藤一樹氏は「三次元顔特徴を用いた DNN に基づく 2D フォトリアリスティック顔動画の生成の検討」で Kinect v2 を利用している。Kinect の顔認識機能の 1 つである High definition face tracking API を用いることで、1347 点の顔の三次元特徴点を取得でき、DNN(Deep Neural Network)に基づくテキストからの顔画像生成手法に利用した。

⑦ Azure Kinect について[57][58]

Azure Kinect は 2020 年 3 月から日本でも販売されるようになった新型の Kinect である。Azure Kinect DK は今までの Kinect と異なり Xbox で使用されるためではなく、最先端の空間コンピューティング開発者キットとして設計され、最も異なる点は Microsoft の最も優れた AI センサーが搭載されている点である。HP には、AI により製造、小売、医療、メディアの企業は運用の安全性を高め、パフォーマンスを向上させ、アウトカムを改善し、カスタマーエクスペリエンスを一変させることができるという紹介されている。また、Azure Kinect は形も従来の Kinect から大きく変わっており、センサーサイズは半分以下となっている。

実際に、Azure Kinect はすでにいくつかのパートナー企業でテスト利用されている。具体的には、ヘルスケア関連の Ocuvra という企業は、病院に Azure Kinect を導入し、患者が転倒する前兆を認識して看護師に通知し、転倒を未然に防ぐシステムを運用している。



図 4.1.7 Azure Kinect

(2) 赤外線センサー

① 赤外線センサーの概要[59][60][61]

赤外線は温度を持つすべての物体から自然に放射されている。物体の温度が高温になると放射される赤外線の放射量も大きくなる。その放射量は温度の4乗に比例して大きくなることが分かっている。赤外線は可視光とマイクロ波の間の眼では見えない領域の光であり、赤外線の中でも近・中・遠・超遠赤外線と分類が分かれている。また、赤外線も可視光と同じように真空中も空気中も直進し、透過や反射もする。赤外線センサーはこの赤外線も利用して温度を測定することができる映像装置である。

赤外線センサーの特徴は大きく3つある。1つ目は非接触による撮影である。赤外線を利用し物体の温度を測るため、物体に直接接触することなく離れたところから温度を計測することがかのである。2つ目は画像・映像による測定である。赤外線センサーは1点の温度だけでなく面として広範囲の温度分布を映像化することができる。そのため効率的かつ確実に以上温度箇所を検出することが可能である。最後に3つ目はリアルタイム・高速測定である。赤外線センサーは応答速度が速く、リアルタイムでの計測が可能である。

Kinectにも赤外線センサーが備わっているが、この赤外線センサーは近赤外を感知するものである。近赤外線センサーには近赤外分光法という測定法が用いられていて、この測定法は透過性が高く対象を非破壊で測定でき、中・遠赤外線に比べて光のエネルギーが低いという特徴がある。農業、食品、工業をはじめ医療等幅広い分野で使用されており、Kinectでは対象までの距離測定に利用されている。しかし、物体の詳細な温度測定に向いているのは遠赤外線を用いたセンサーである。そのため本研究ではKinectとは別の遠赤外線センサーを用いることとした。

本研究で使用した赤外線センサーはNEC AVIO TS9260である。図4.1.8に赤外線センサーを示す。一般的に赤外線センサーの画角は小さく、本研究では広角レンズを装着して使用した。先行研究において、広角レンズを装着した場合の本赤外線センサーの画角を計測した結果、水平画角は44度、垂直画角は36度であった。



図 4.1.8 遠赤外センサー NEC AVIO TS9260

② 赤外線センサーで取得できるデータ

赤外線センサーで読み取った赤外線画像は -40°C ～ 120°C の範囲で記録した。図 4.1.9 に、本研究の実船実験で取得した赤外線画像を示す。この画像は左上を原点とした 320×240 ピクセルのカラー画像であり、1 ピクセル毎に任意の箇所の温度が小数点以下第 5 位まで記録されている。実験で計測した赤外線画像 1 枚毎に、温度情報を Excel データに変換して使用した。

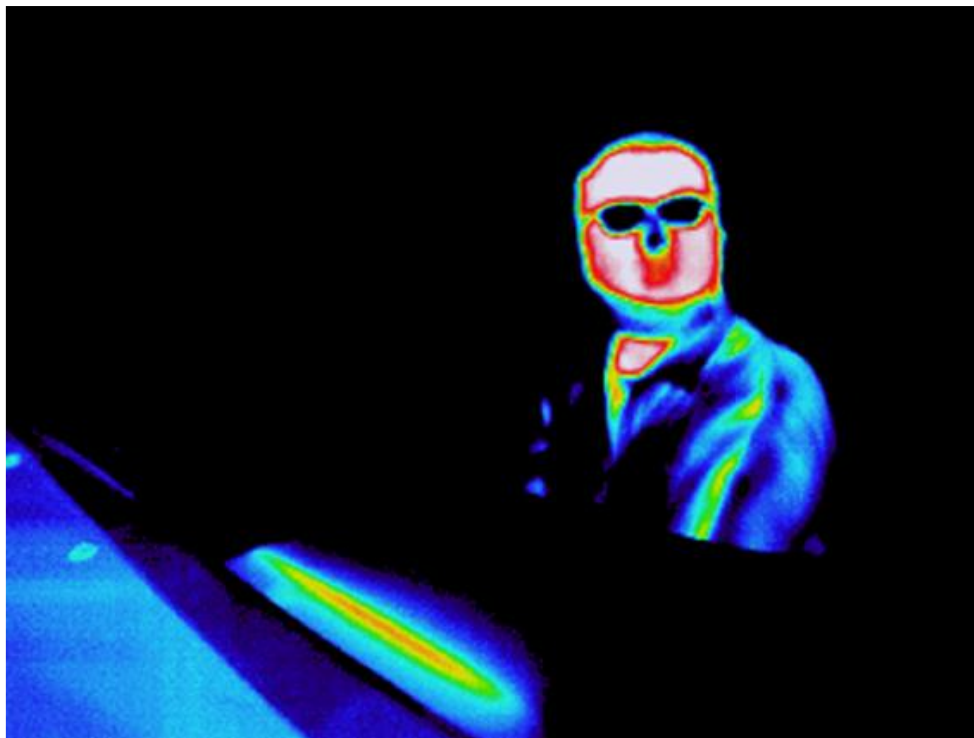


図 4.1.9 実験時に撮影した赤外線画像の一例

4.2 Kinect の鼻部座標を用いた鼻部皮膚温度の自動取得方法

(1) 鼻部皮膚温度の自動取得方法の概要

Kinect と赤外線センサーで被験者を撮影し、赤外線画像の Excel データから、同じ時間に取得した Kinect の顔認識機能による鼻部座標に対応する座標の温度データを取得することで鼻部皮膚温度の自動取得を行った。

本実験で同時刻に撮影された Kinect の cap 画像と、赤外線センサーで取得した赤外線画像を図 4.2.1 に示す。また、Kinect 画像と赤外線画像の画素数とそれぞれのセンサーの画角を表 4.2.1 に示す。図 4.2.1 と表 4.2.1 に示すとおり、Kinect で取得した画像と赤外線画像では、画角と画素数が異なり、水平画素の並びが左右反転しているという違いがあった。このデータの違いを解決するために、Kinect の任意の座標と赤外線画像の座標が対応するように座標合わせを行う必要があった。

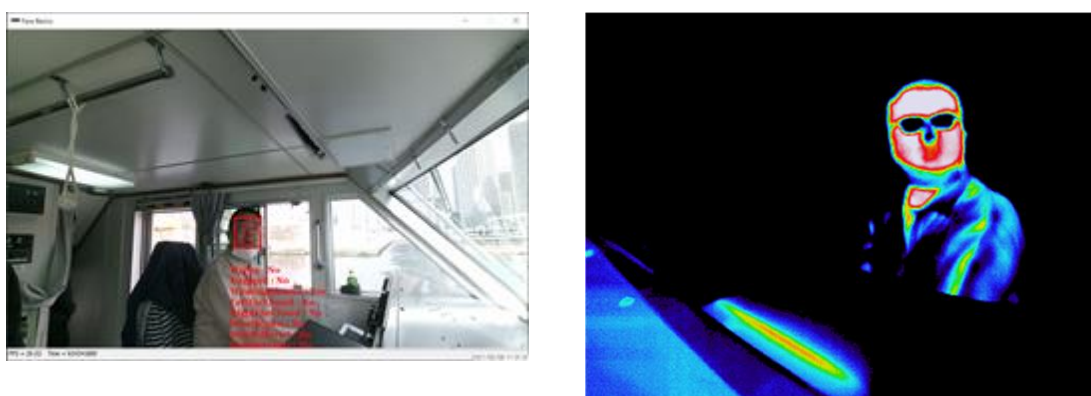


図 4.2.1 cap 画像と赤外線画像の比較

表 4.2.1 Kinect 画像と赤外線画像の比較

	Kinect	赤外線画像
画素数 [pixel]	1920×1080	320×240
水平画角 [deg.]	70	44
垂直画角 [deg.]	60	36

(2) 座標合わせの流れ

- I. IIで算出した計算式を他の時間帯でも適用し、しっかりと対応しているかを確認し、誤差があった場合は修正

本実験では Kinect と赤外線センサーの 2 種類のセンサーを使用しているため実験期間中に 2 つのセンサーの位置関係が変化しないよう、図 4.2.2 に示すように位置を固定した。そして固定した状態の 2 つのセンサーを使用し、被験者を撮影した。

次に Kinect の鼻部座標、赤外線画像が共に不具合なく取得できている時間帯を 1 か所抽出し、その時間の赤外線画像から被験者の鼻と思われる位置の座標を手動で取得した。そして Kinect の鼻部座標と比較し暫定的な座標合わせの計算式を導いた。導き出した計算式は以下のように導いた。

● 座標合わせの計算式の算出方法

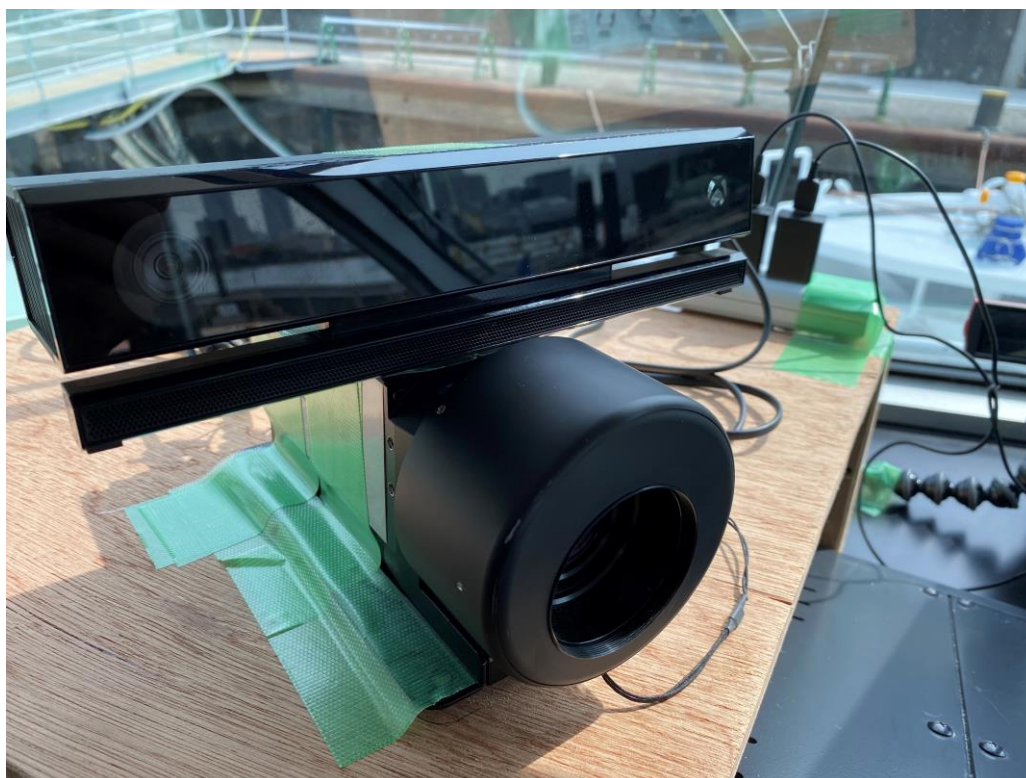


図 4.2.2 実験時の Kinect と赤外線センサーの様子
(上部が Kinect, 下部が赤外線センサー)

座標合わせの際には、Kinect 座標と赤外線画像は画角、画素数が異なり、左右が反転しているということが問題となってくる。またセンサー位置が異なるため、実際に撮影した Kinect の cap 画像と赤外線画像から、2つの画像は図 4.2.3 のような位置関係になっていると判断した。なお図 4.2.3 は位置関係を分かりやすくするために左右反転の問題に関しては修正した状態のものである。青色の枠は Kinect 画像の輪郭、赤色の枠は赤外線画像の輪郭を表している。Kinect と赤外線センサーによる位置関係と画角のずれによる差を $dx[px]$ 、 $dy[px]$ 、Kinect 画像における鼻部座標を (Kx, Ky) 、赤外線画像における鼻部座標を (Ix, Iy) とした。また、Kinect 画像と赤外線画像の画角および画素数は表 4.2.1 であるので、それぞれの画像における単位ピクセル当たりの画角の度数は表 4.2.2 のようになる。

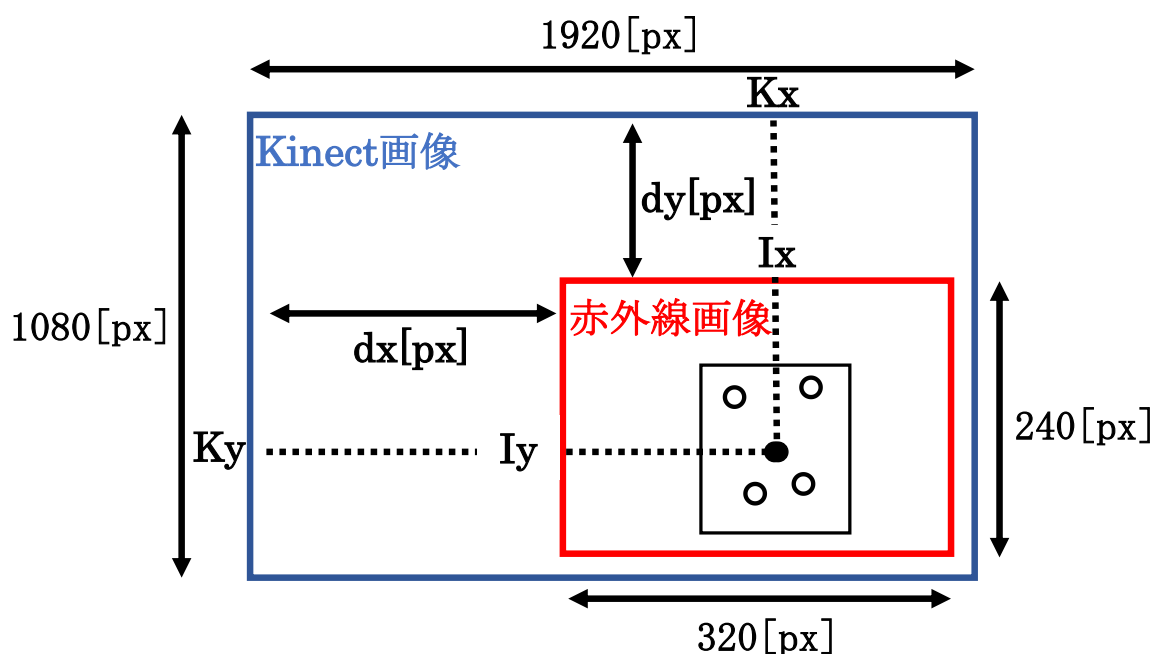


図 4.2.3 Kinect 画像と赤外線画像の位置関係

表 4.2.2 Kinect 画像と赤外線画像の単位ピクセル当たりの画角 $^{\circ}$]

	Kinect 画像	赤外線画像
水平方向	70/1920	44/320
垂直方向	60/1080	36/240

これらを踏まえると以下のような計算式を導くことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} Ix = \{ \underbrace{(1920 - Kx)}_{\textcircled{1}} - \underbrace{dx}_{\textcircled{2}} \} \times \underbrace{\frac{70 \div 1920}{44 \div 320}}_{\textcircled{3}} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Iy = (Ky - \underbrace{dy}_{\textcircled{2}}) \times \underbrace{\frac{60 \div 1080}{36 \div 240}}_{\textcircled{3}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式(1)の①では Kx の値を Kinect 画像の x 軸方向のピクセル数である 1920 から引くことで、Kinect 画像を左右反転させた座標に変換している。Kinect 画像と赤外線画像は左右のみ反転しているため (2) の式には①に該当する計算はない。式(1)(2)の②ではそれぞれ dx 、 dy を引くことで赤外線画像上の原点からの座標に修正している。この時点ではあくまで Kinect 画像上での座標である。そのため、この座標を式(1)(2)の③の計算で、Kinect 画像と赤外線画像の単位ピクセル当たりの画角の比率を掛け合わせることにより、赤外線画像上の座標へと変換している。

Kinect が取得した鼻部座標と、赤外線画像から手動で取得した鼻部座標は、今回は以下のような値が取得できた。

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx = 846.6135 \\ Ky = 667.4775 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Ix = 209 \\ Iy = 77 \end{array} \right.$$

この値を(1)、(2)の式に代入し dx 、 dy を逆算する。その結果

$$\left\{ \begin{array}{l} dx \cong 285.1579 \\ dy = 459.5775 \end{array} \right.$$

であった。よって、算出された dx 、 dy を式(1)及び式(2)に代入すると

$$\left\{ \begin{array}{l} Ix = \{(1920 - Kx) - 285.1579\} \times \frac{70 \div 1920}{44 \div 320} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Iy = (Ky - 459.5775) \times \frac{60 \div 1080}{36 \div 240} \end{array} \right. \quad (4)$$

という式を導くことができた。

次に座標合わせの計算が正確に行えているか検証するために Matlab で、赤外線画像の Excel データから簡易的な赤外線画像を描き、その画像上に計算により算出した座標（以下算出点）をプロットできるようにプログラムを作成した。そして Kinect 座標、赤外線画像が安定して取得できている時間帯を数秒間抽出し、その時間帯における (3) 及び (4) の式で算出した両目と鼻の座標をプロットした赤外線画像を作成した。その際の赤外線画像の一例を図 4.2.4 に示す。今回作成した赤外線画像は約 8 秒間であり 254 枚であった。画像上の 2 つの直線 $x=209$ 、 $y=77$ の交点は座標合わせの計算に使用した時間の、手動で取得した鼻の座標であり、座標合わせの基準点である。図 4.2.4 のように全体的に算出点がずれていることが分かる。詳しく他の画像も確認してみると被験者が顔を動かしたタイミングと、算出点が動いていくタイミングに時間的な差が生じていたことが分かった。Kinect と赤外線センサーは異なる 2 つのパソコンで動作・計測しており、実験の時間も長かったため 2 つのパソコンの時間に差が生じてしまったと考えられる。Matlab で作成した赤外線画像で被験者の顔が動き出すタイミングと、それに遅れて算出点が動き出すタイミングから Kinect 画像と赤外線画像の時間の差がどの程度なのかを確認した。結果、Kinect 画像の方が約 2.03 秒早く時間が進んでいた。

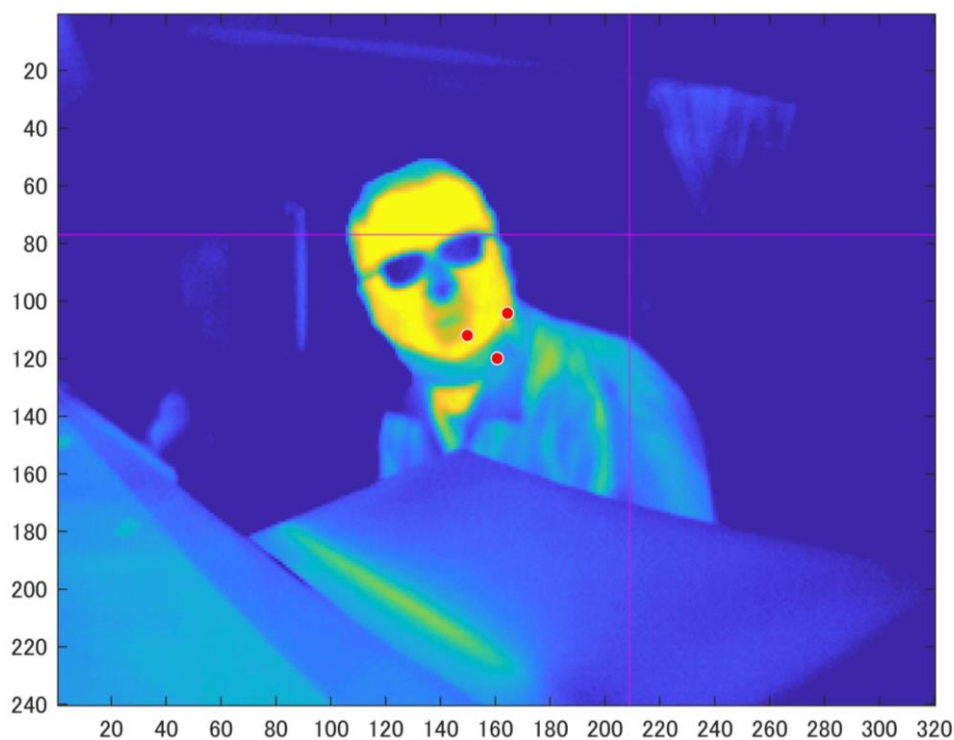


図 4.2.4 算出点をプロットした赤外線画像

Kinect 画像と赤外線画像の間の時間のずれが分かったため、再度座標合わせの計算を行った。Kinect 画像と、それに対応する赤外線画像を時間のずれを考慮して抽出し、その画像から被験者の鼻の座標を手動で取得することで以下のような座標合わせの計算式を導いた。

$$Ix = \{(1920 - Kx) - 284.495\} \times \frac{70 \div 1920}{44 \div 320} \quad (5)$$

$$Iy = (Ky - 493.938) \times \frac{60 \div 1080}{36 \div 240} \quad (6)$$

この式を用いた算出点をプロットした赤外線画像の被験者の顔面付近の様子を図 4.2.5 に示す。計算に用いた座標が変わっているため基準点の位置が $x=203$ 、 $y=85$ の 2 つの直線の交点になっている。図 4.2.5 を見ると、基準点に近い場所では算出点は正しくプロットされているように見える。しかし基準点から右にずれるほど算出点は実際の両目、鼻の位置から左にずれ、逆に基準点から左にずれるほど算出点は右にずれていることが分かる。

このような算出点のずれ方を考えたところ (1)、(2) 式の③の部分に原因があるのではないかと予想できた。Kinect 画像と赤外線画像の、単位ピクセル当たりの画角の比率が異なるため基準点から離れた位置に行くほど算出点のずれが大きくなったと考えられた。そのため Kinect 画像と赤外線画像の画角を検証しなおすことにした。

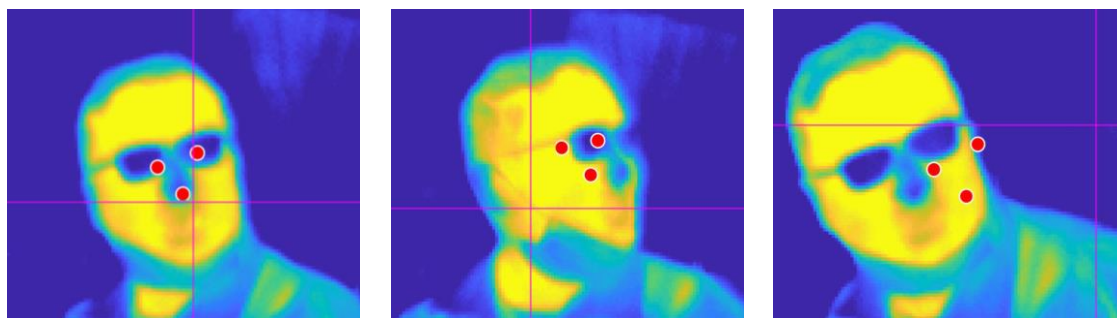


図 4.2.5 算出点をプロットした赤外線画像の顔面周辺の様子①

- Kinect 画像と赤外線画像の画角の検証

画角の検証は図 4.2.6 のようにセンサーを設置して行った。平らな壁面を Kinect 及び赤外線センサーで撮影し、撮影された映像をパソコンで確認しながら画面の四隅の位置を調べ、簡易的に画角を計算した。

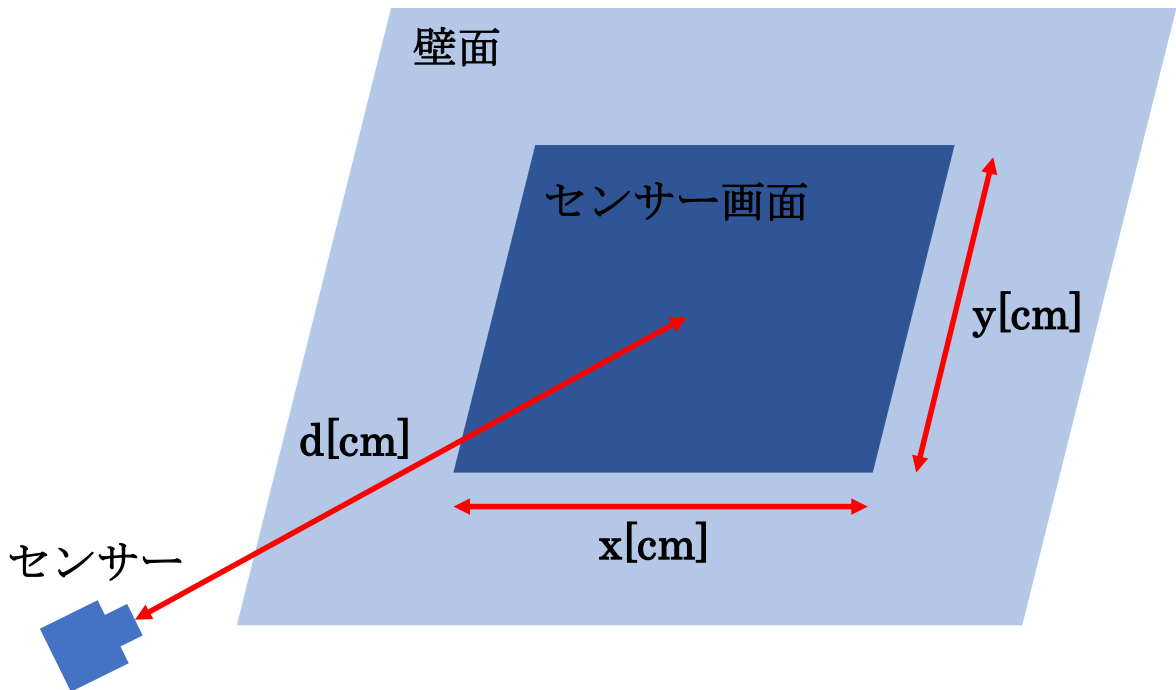


図 4.2.6 画角検証の際の様子

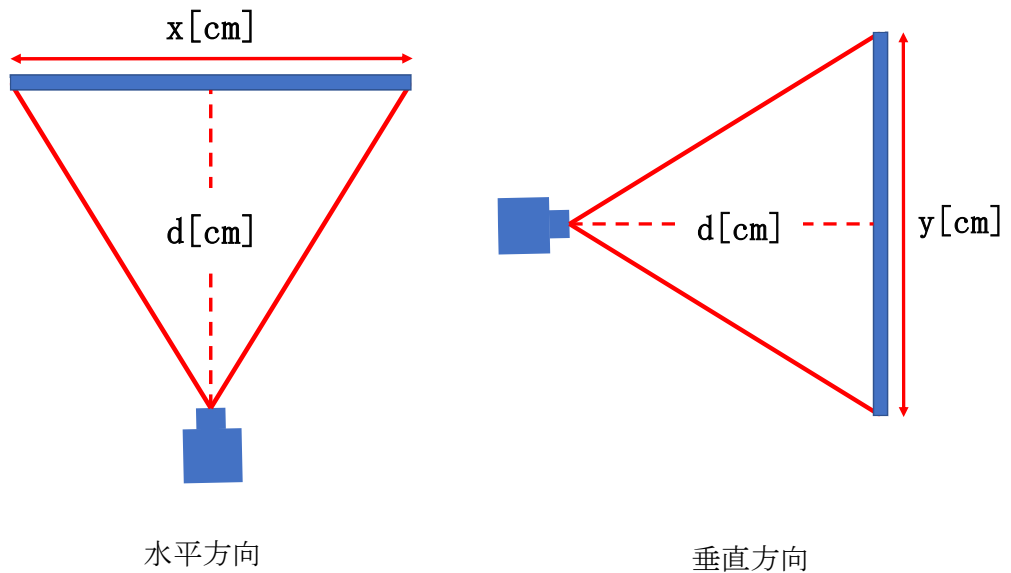


図 4.2.7 水平方向と垂直方向の様子

Kinect で検証を行った時は、 $d=93$ 、 $x=167$ 、 $y=95$ だった。そのため、Kinect の水平画角、垂直画角は

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水平画角} : \theta = 2 \times \arctan\left(\frac{167 \div 2}{93}\right) \times \frac{180}{\pi} \cong 83.8[^\circ] \\ \text{垂直画角} : \theta = 2 \times \arctan\left(\frac{95 \div 2}{93}\right) \times \frac{180}{\pi} \cong 54.1[^\circ] \end{array} \right.$$

となった。この値は Kinect の動作仕様に記載されていた水平画角 70° 、垂直画角 60° と大きく異なる。Kinect の画角と、Kinect の顔認識機能を使用する時で画角が異なっている可能性が考えられる。前回の研究でも測定したが、赤外線センサーの画角も測定しなおした。赤外線センサーで検証を行った時は、 $d=93$ 、 $x=75$ 、 $y=59$ だった。そのため、赤外線センサーの水平画角、垂直画角は

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水平画角} : \theta = 2 \times \arctan\left(\frac{75 \div 2}{93}\right) \times \frac{180}{\pi} \cong 43.9[^\circ] \\ \text{垂直画角} : \theta = 2 \times \arctan\left(\frac{59 \div 2}{93}\right) \times \frac{180}{\pi} \cong 35.2[^\circ] \end{array} \right.$$

となった。これは前回の研究の測定結果である水平画角 44° 、垂直画角 36° と測定結果は大きく変化しなかった。画角の検証の結果 Kinect と赤外線センサーの画角は表 4.2.3 のようにまとめることができた。

表 4.2.3 Kinect と赤外線センサーの画角

	Kinect	赤外線センサー
水平画角[$^\circ$]	83.8	43.9
垂直画角[$^\circ$]	54.1	35.2

再検証から得られたセンサーの画角を利用すると (1)、(2) の式は以下のように修正することができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} Ix = \{(1920 - Kx) - dx\} \times \frac{83.8 \div 1920}{43.9 \div 320} \\ Iy = (Ky - dy) \times \frac{54.1 \div 1080}{35.2 \div 240} \end{array} \right. \quad (7)$$

Kinect で取得した鼻部座標と、赤外線画像から手動で取得した座標は以下のような値を取得することができた。

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx = 869.905 \\ Ky = 723.438 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Ix = 203 \\ Iy = 85 \end{array} \right.$$

この値を (7)、(8) の式に代入し dx、dy を求めると

$$\left\{ \begin{array}{l} dx = 412.0257 \\ dy = 474.5655 \end{array} \right.$$

であった。よって、算出された dx、dy を (7)、(8) に代入すると

$$\left\{ \begin{array}{l} Ix = \{(1920 - Kx) - 412.0257\} \times \frac{83.8 \div 1920}{43.9 \div 320} \\ Iy = (y - 474.5655) \times \frac{54.1 \div 1080}{35.2 \div 240} \end{array} \right. \quad (9)$$

という 2 式を導くことができた。この式を用いた算出点をプロットした赤外線画像の被験者の顔面周辺の様子を図 4.2.8 に示す。

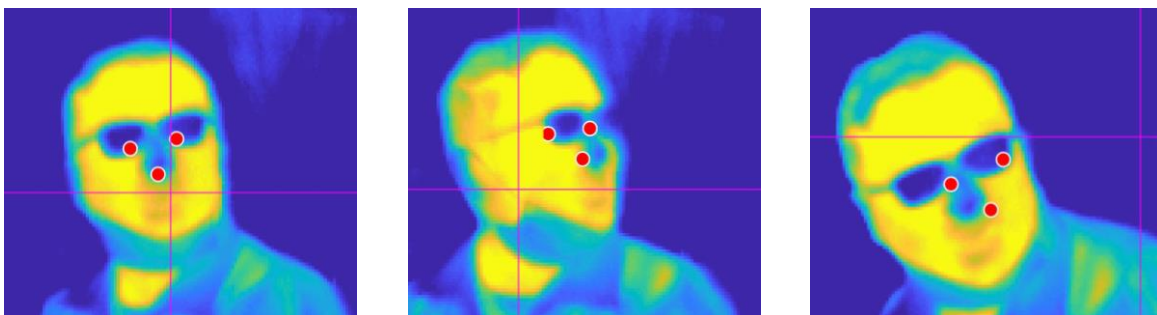


図 4.2.8 算出点をプロットした赤外線画像の顔面周辺の様子②

図 4.2.8 を見て分かる通り、センサーの画角を変更する前の図 4.2.5 と比べると、実際の両目、鼻の位置と算出点のずれは小さくなっているものの同様のずれ方をしていることが分かる。この理由は画角の検証を手動で行ったことによる誤差だと考えられる。手動での検証でさらに正確に画角を求めることは困難だと判断し、基準点からの距離に倍率をかけることで算出点を修正することとした。基準点から大きく離れ、算出点がずれている時の赤外線画像を使用して、実際の両目、鼻の座標と比較することで、修正する際の倍率を x 方向、y 方向で別々で求めた。算出点がずれている時の赤外線画像の様子を図 4.2.9 に示す。鼻の算出点の座標が (I_x, I_y) 、赤外線画像から手動で取得した鼻の座標が (X, Y) 、 $x=203$ および $y=85$ は基準点を通る直線である。修正する際の倍率の x 方向を α 、y 方向を β とする。これにより、以下のような式が成り立つ。

$$\begin{cases} x \text{ 方向} : X = 203 + \alpha(I_x - 203) \\ y \text{ 方向} : Y = 85 + \beta(I_y - 85) \end{cases}$$

この式に取得した座標データを代入し α 、 β を求めた。実際に取得した座標データは

$$\begin{cases} X = 145 \\ Y = 100 \end{cases} \quad \begin{cases} I_x = 153.012 \\ I_y = 100.072 \end{cases}$$

であった。すると α 、 β は次のように求まった。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{X - 203}{I_x - 203} = \frac{145 - 203}{153.012 - 203} \approx 1.16 \\ \beta = \frac{Y - 85}{I_y - 85} = \frac{100 - 85}{100.072 - 85} \approx 1.00 \end{cases}$$

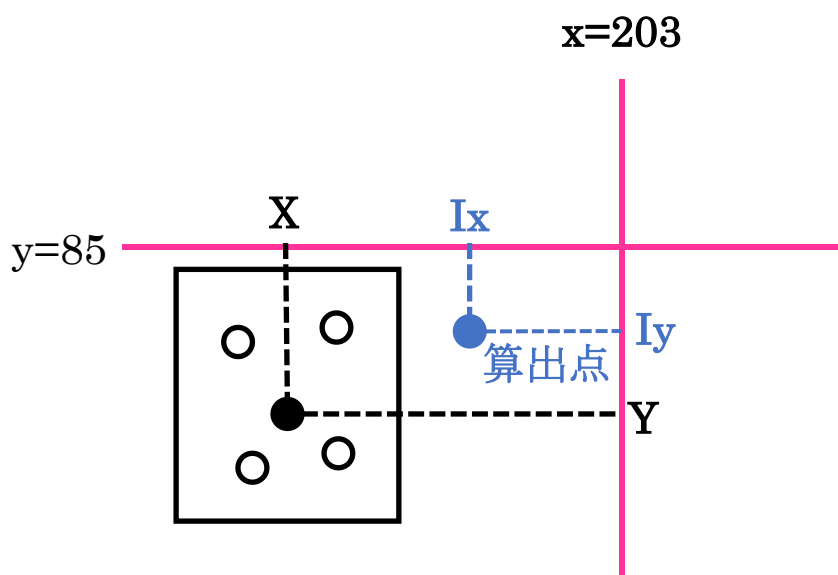


図 4.2.9 算出点がずれている時の様子

よって、求めた α 、 β を用いて算出点の修正も含めた座標合わせの計算式は以下のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} Ix = 203 + 1.16 \times \left(((1920 - Kx) - 412.5655) \times \frac{83.8 \div 1920}{43.9 \div 320} - 203 \right) \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Iy = 85 + 1 \times \left((Ky - 474.5655) \times \frac{54.1 \div 1080}{35.2 \div 240} - 85 \right) \end{array} \right. \quad (12)$$

この計算式を用いた算出点をプロットした赤外線画像の顔面周辺の様子が図 4.2.10 である。基準点の右側に顔面がある時に鼻の位置は正しくプロットされているが、目の位置がずれてしまっている。これは Kinect が被験者の眼鏡の淵を目と誤認識したためだと考えられる。鼻の位置は全体を通して正しくプロットされていたため、(11)、(12) の計算式は正しく座標合わせができていると判断し、本実験ではこの式を用いることとした。

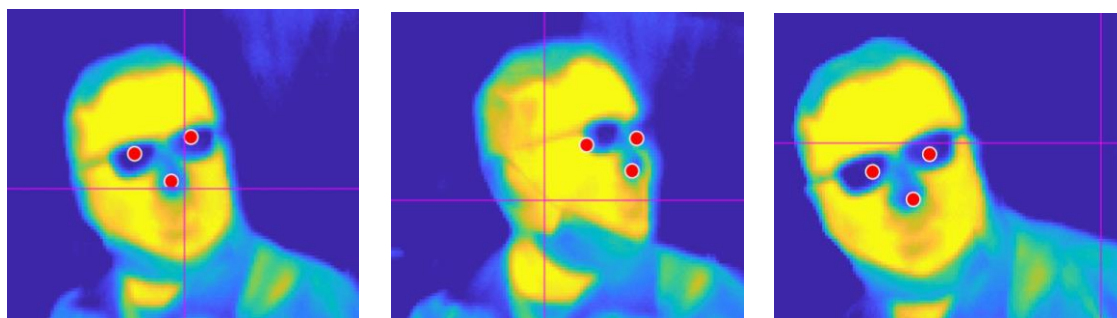


図 4.2.10 算出点をプロットした赤外線画像の顔面周辺の様子③

今回行った座標合わせの計算式の修正内容は以下の 3 点であった。

- i. Kinect 画像と赤外線画像の時間のずれの修正
- ii. Kinect 画像と赤外線画像の画角による修正
- iii. 基準点から算出点の距離による修正

これらを修正する際の細かな値は、設置する際の Kinect と赤外線センサーの位置関係、使用する 2 台のパソコンの時間誤差によって異なるため実験前に詳しく調べておく必要がある。

第 5 章 Kinect の性能検証実験

本研究で使用した Kinect v2 と赤外線センサーは室内実験においては問題なく使用することができた。しかし、実船においての使用では日光や波などの影響、また船内の設置場所の制約等様々な問題が考えられる。Kinect v2 は屋外での使用が可能とされているが、船上での使用までは想定されていないと考えられるため、顔認識精度を前章で定義した Kinect 成功率と cap 成功率を指標として検証実験を行った。

5.1 日光による Kinect の顔認識への影響

本研究で使用した Kinect は屋外での使用が可能とされている。しかし小向華子氏の研究では、Kinect を船橋で使用したところ、船橋内に入る光の変化から何もないところに人間を検知した事例が報告されている。また、室内における使用でも Kinect の関節データが予測点となる割合が多い時間帯が存在したと述べられている[62]。操船者が見張り当直作業を行っている船橋は、一般的に窓が大きく、太陽から日光だけでなく海面からの反射光もあり、日光の影響を受けやすい環境であると考えられる。そのため Kinect に対して順光、逆光の二つの場合で、日光が Kinect による顔認識に与える影響を検証した。

(1) 実験方法

実験は南向きに大きな窓のある室内で行った。日光の当たり方による Kinect の顔認識精度を検証するため、11 時から 16 時までの 5 時間、30 分おきに直立している被験者を約 5 分間正面から撮影した。実験時の室内の機器の配置と日光の照射角度を図 5.1.1 と図 5.1.2 に示す。また、実験場所の写真を図 5.1.3 に示す。

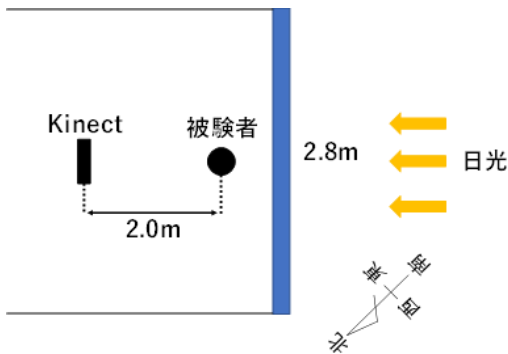


図 5.1.1 逆光の場合の器具配置

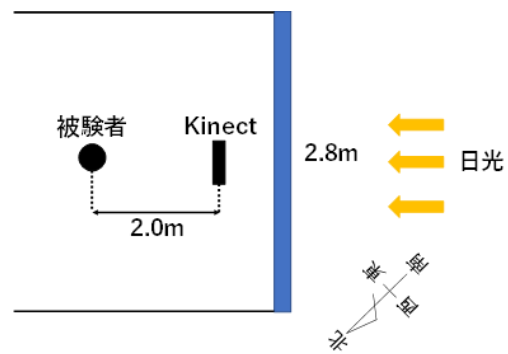


図 5.1.2 順光の場合の器具配置



図 5.1.3 実験時の室内の様子

(2) 計測項目

本実験の計測項目は、下記①から③の3項目である。

- ① Kinectにより取得した顔の各部位の座標データ
- ② Kinectによる顔面認識情報を付加した可視画像
- ③ 天候

(3) 計測結果

① 逆光の場合

表 5.1.1 に実験時の天候を示す。また日光が Kinect に対して逆光の場合の実験結果を、表 5.1.2、表 5.1.3 に示す。結果を、横軸に実験を行った時刻、縦軸にそれぞれのデータを正常に取得することができた割合 (Kinect 成功率[%]、cap 成功率[%]) をとり表したグラフが図 5.1.4、図 5.1.5 である。

表 5.1.1 実験時の天候

	11/4	11/5	11/6
11:00	晴れ	晴れ	晴れ
11:30	晴れ	晴れ	曇り
12:00	晴れ	晴れ	曇り
12:30	晴れ	晴れ	曇り
13:00	晴れ	晴れ	曇り、晴れ
13:30	晴れ	晴れ	曇り
14:00	晴れ	晴れ	曇り
14:30	晴れ	晴れ	曇り
15:00	晴れ	晴れ	曇り
15:30	晴れ	晴れ	曇り
16:00	晴れ	晴れ	曇り、晴れ

表 5.1.2 逆光の場合の Kinect 成功率

	11/4			11/5			11/6			平均
	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	成功率 [%]
11:00	5779	5766	99.8	6501	6465	99.4	8349	8331	99.8	99.7
11:30	6262	6224	99.4	6613	6476	97.9	8296	8296	100	99.6
12:00	6008	5899	98.2	6486	6227	96.0	8152	8152	100	98.7
12:30	6639	6489	97.7	6562	6145	93.6	5865	5864	100	97.9
13:00	5981	5784	96.7	6240	6109	97.9	6635	6634	100	96.8
13:30	6855	6799	99.2	6436	6394	99.3	6795	6793	100	99.0
14:00	6266	6238	99.6	6733	6727	99.9	7512	7512	100	99.6
14:30	6535	6529	99.9	6455	6431	99.6	6816	6816	100	99.4
15:00	6411	6111	95.3	7152	6687	93.5	6899	6899	100	98.3
15:30	6992	6987	99.9	6564	5551	84.6	6224	6224	100	97.8
16:00	7587	7584	100	7282	7254	99.6	3994	3983	99.7	94.8

表 5.1.3 逆光の場合の cap 成功率

	11/4			11/5			11/6			平均
	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	成功率 [%]
11:00	221	218	98.6	224	211	94.2	222	220	99.1	97.3
11:30	222	202	90.1	223	198	88.8	219	214	97.7	92.5
12:00	221	194	87.8	224	195	87.1	222	218	98.2	91.0
12:30	220	201	91.4	222	200	90.1	224	222	99.1	93.5
13:00	223	187	83.9	219	201	91.8	221	217	98.2	91.3
13:30	224	217	96.9	222	209	94.1	220	217	98.6	96.6
14:00	226	224	99.1	223	213	95.5	223	223	100	98.2
14:30	223	201	90.1	223	195	87.4	220	219	99.5	92.4
15:00	224	194	86.6	245	207	84.5	220	220	100	90.4
15:30	228	218	95.6	222	170	76.6	219	219	100	90.7
16:00	225	224	99.6	222	215	96.8	218	214	98.2	98.2

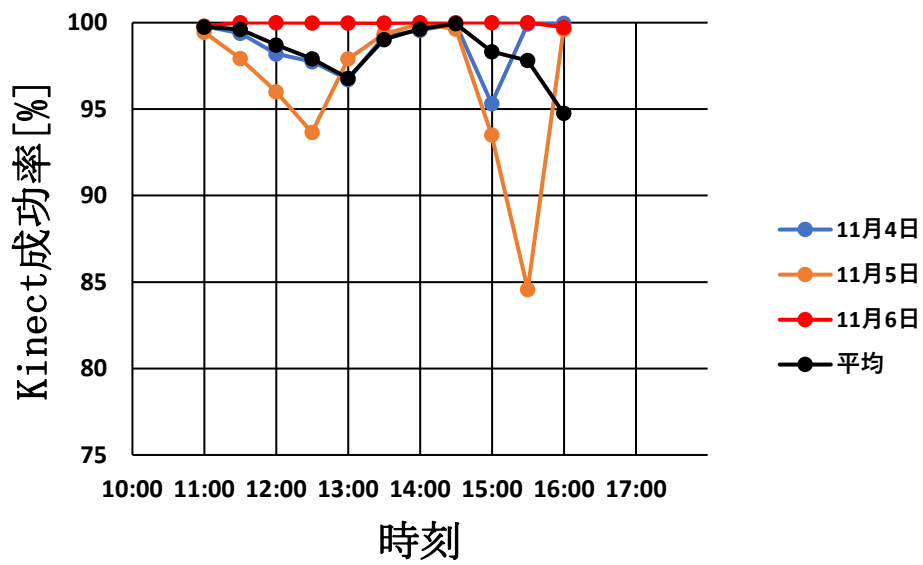


図 5.1.4 逆光の場合の Kinect 成功率

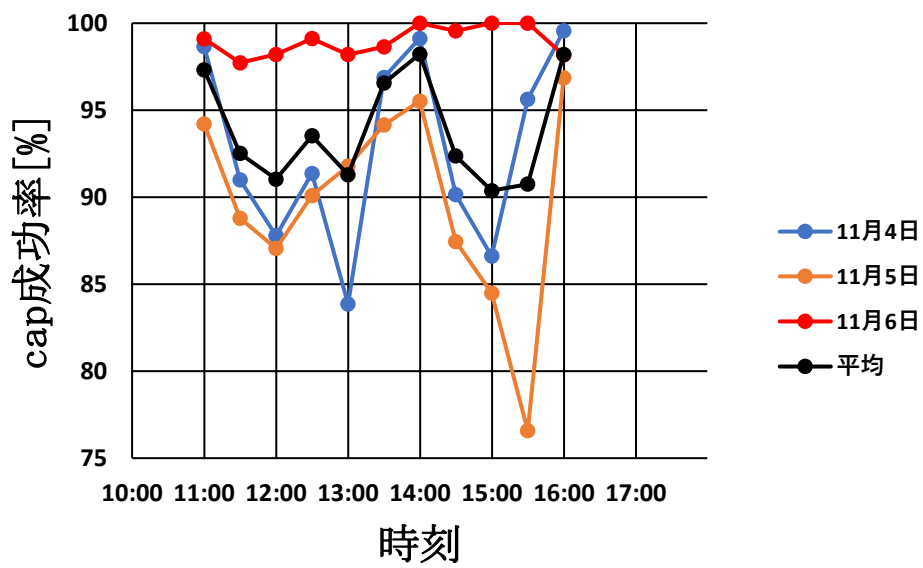


図 5.1.5 逆光の場合の cap 成功率

② 順光の場合

表 5.1.4 に実験時の天候を示す。また日光が Kinect に対し順光の場合の実験結果を、表 5.1.5、表 5.1.5 に示す。この結果を、横軸に実験を行った時刻、縦軸にそれぞれのデータを正常に取得することができた割合 (Kinect 成功率[%]、cap 成功率[%]) をとり表したグラフが図 5.1.6、図 5.1.7 である。

表 5.1.4 実験時の天候

	11/9	11/17	11/18
11:00	曇り、晴れ	晴れ	晴れ
11:30	曇り、晴れ	晴れ	晴れ
12:00	晴れ、曇り	晴れ	晴れ
12:30	曇り	晴れ	晴れ
13:00	曇り	晴れ	晴れ
13:30	曇り	晴れ	晴れ
14:00	晴れ、曇り	晴れ	晴れ
14:30	曇り	晴れ	晴れ
15:00	曇り	晴れ	晴れ
15:30	晴れ	晴れ	晴れ
16:00	晴れ	晴れ	晴れ

表 5.1.4 順光の場合の Kinect 成功率

	11/9			11/17			11/18			平均
	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	成功率 [%]
11:00	7120	7120	100	7072	7072	100	6500	6500	100	100
11:30	7139	7139	100	7087	7086	100	6941	6941	100	100
12:00	6116	6116	100	5750	5750	100	6819	6819	100	100
12:30	7133	7133	100	6846	6844	100	6702	6702	100	100
13:00	6920	6920	100	6752	6752	100	6808	6808	100	100
13:30	5344	5344	100	5793	5793	100	6711	6711	100	100
14:00	5725	5725	100	5675	5675	100	6579	6540	99.4	100
14:30	5836	5836	100	0	0	0.00	0	0	0.00	99.8
15:00	6785	6776	99.9	0	0	0.00	0	0	0.00	33.3
15:30	6390	6380	99.8	0	0	0.00	6920	5547	80.2	33.3
16:00	6685	6685	100	7072	7072	100	7069	7069	100	60.1

表 5.1.5 順光の場合の cap 成功率

	11/9			11/17			11/18			平均
	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]	成功率 [%]
11:00	221	218	98.6	222	219	98.6	218	203	93.1	96.8
11:30	220	218	99.1	223	218	97.8	219	219	100	99.0
12:00	225	221	98.2	226	214	94.7	220	220	100	97.6
12:30	222	217	97.7	220	216	98.2	216	213	98.6	98.2
13:00	222	220	99.1	222	215	96.8	219	219	100	98.7
13:30	222	211	95.0	231	224	97.0	220	212	96.4	96.1
14:00	221	217	98.2	223	217	97.3	219	207	94.5	96.7
14:30	222	217	97.7	0	0	0.00	0	0	0.00	32.6
15:00	216	214	99.1	0	0	0.00	0	0	0.00	33.0
15:30	220	220	100	0	0	0.00	220	167	75.9	58.6
16:00	219	217	99.1	221	220	99.5	219	217	99.1	99.2

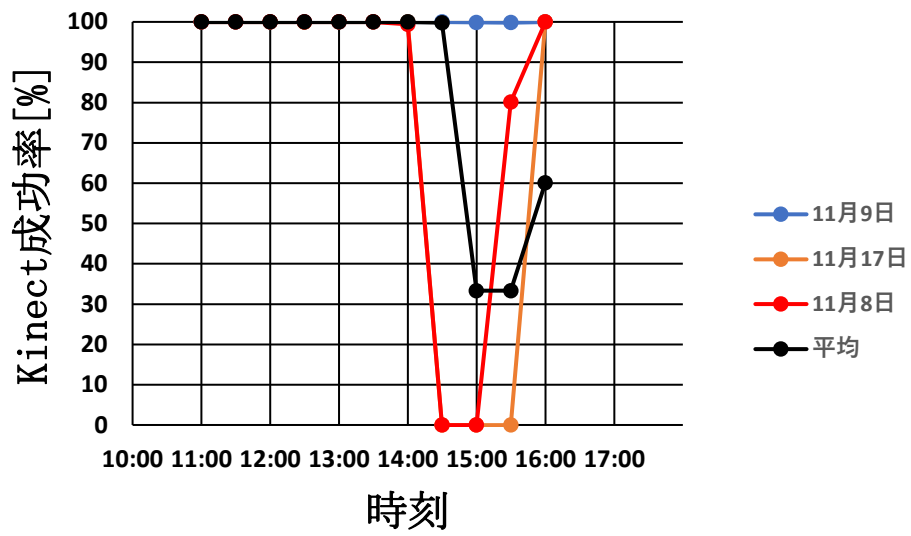


図 5.1.6 順光の場合の Kinect 成功率

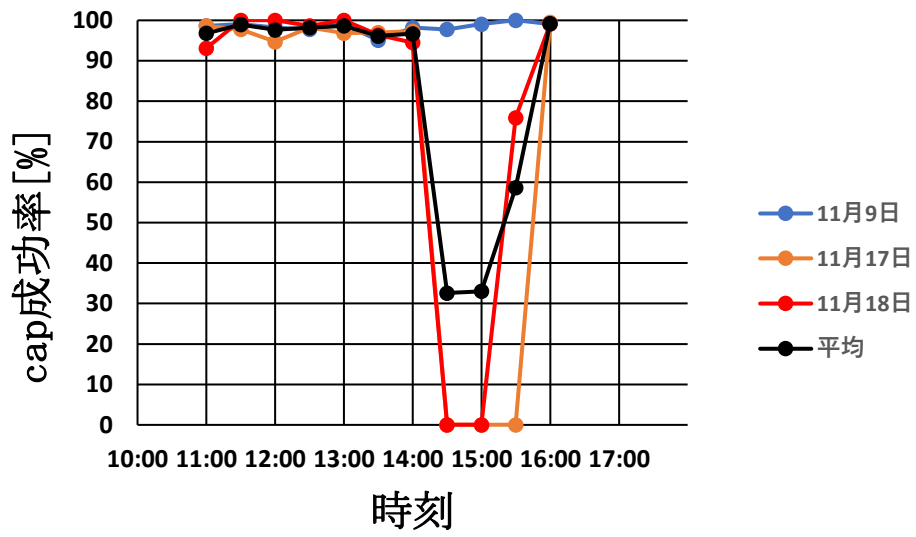


図 5.1.7 順光の場合の cap 成功率

(4) 検証結果

① 両目、鼻、口の両端が日光を受けると測定が困難になることがある

この実験を通して最も cap、Kinect とともに成功率が低かったのは、順光の場合の 11 月 17 日の 14.30~15:30 及び、11 月 18 日の 14:30~15:00 であった。この時間帯においては、実験の 5 分間を通して 1 度も Kinect が顔を認識することがなく、座標データを取得することができなかった。図 5.1.8 はこれらの時間帯に取得したキャプチャ画像の一例である。また、図 5.1.9 は図 5.1.8 と同じ日の、Kinect 成功率及び cap 成功率（以下、データ取得の成功率）が高かった時間帯のキャプチャ画像の一例である。2 つの図を比較すると、図 5.1.8 では両目、鼻、口の両端に直射日光が当たり画像の明度が高くなってしまっていることが分かる。

両目、鼻、口も両端の全てが直射日光を受けてしまうのを防ぐために帽子をかぶり、両目だけが帽子のつばの陰に隠れるようにして実験をした。その際に取得した画像が図 5.1.10 である。この実験の結果、帽子の影により顔認識精度は改善されず、Kinect が顔を認識することはできなかった。

② 順光と逆光の違い

逆光の場合、順光の場合と比べて顔認識精度が悪くなったケースでも、全くデータを取得することができないという状況にはならなかった。順光の場合にデータ取得の成功率が低かったのは、上記のように両目、鼻、口の両端が直射日光を受け、顔全体の明度が高くなっている時だった。一方、逆光の場合にデータ取得の成功率が低くなるのは、キャプチャ画像に太陽が映り込んだ時だった。しかし、この場合においても順光の場合とは異なり、Kinect が全く顔を認識できないということはなく Kinect 成功率が 84.6%、cap 成功率が 76.6%に落ちるのみであったが、図 5.1.11 のような Kinect による顔の誤認識が比較的多くみられた。図 5.1.11 では Kinect が認識した鼻の位置が実際の位置とずれてしまっている。

③ 天候による違い

まず、曇りの場合は逆光、順光どちらの場合においても Kinect はほぼ 100%の精度で顔を認識することができていた。晴れの場合においても両目、鼻、口の両端に直射日光が当たっている時、キャプチャ画像に太陽が映り込んだ時を除くと、Kinect は高い精度で顔を認識できていることが分かった。

また、逆光の場合にキャプチャ画像に太陽が映り込んでいないにも関わらず、12:30~13:00 にかけて Kinect のデータ取得の失敗率が一時的に高くなっている。これは室内の壁で反射した日光が Kinect に影響を及ぼしたのではないかと考えられる。



図 5.1.8 顔認識精度が低かった例



図 5.1.9 顔認識精度が高かった例



図 5.1.10 帽子をかぶった際の例

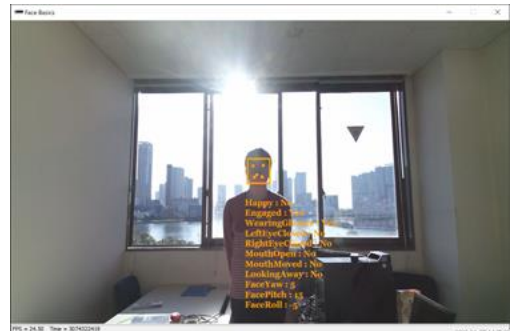


図 5.1.11 顔の誤認識の例

5.2 距離による Kinect の顔認識への影響

Kinect の動作仕様によると、人の検出距離範囲は 500mm~4,500mm とされている[51]。しかし、これは人を検出することができる範囲であり、顔認識の範囲には少し違いがあると考えた。船の船橋という設置スペースが限られている中で、操船者からどの程度の距離範囲であれば顔認識ができるのか、またどの程度の距離で顔認識の精度が良くなるかを検証した。

(1) 実験方法

実験は室内で行い、日光の影響を受けないようにカーテンを閉めて行った。実験は被験者が Kinect の真正面で静止している状況を、Kinect で 3 分間撮影して行った。Kinect の高さは被験者の鼻の位置と合わせて床から 160cm の位置に設置した。図 5.2.1 に被験者と Kinect センサーの位置関係を示す。図 5.2.1 に示すとおり、実験では人の検出距離範囲である 50cm の位置から、50cm 置きに Kinect が顔を認識しなくなる距離まで離れることで、検証を行った。

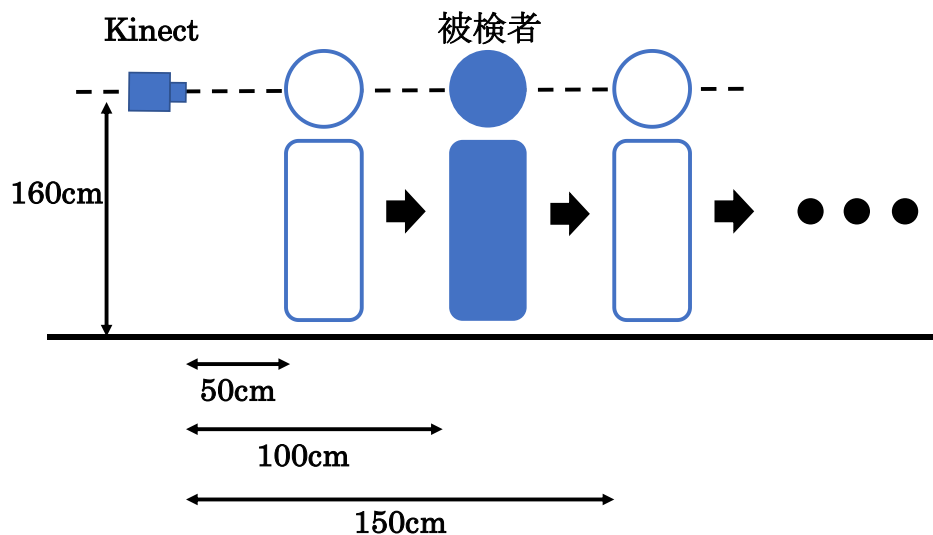


図 5.2.1 距離による顔認識精度の検証実験における被験者と Kinect センサーの位置関係

(2) 計測項目

本実験の計測項目は以下の 2 つである。

- ① Kinect により取得した顔の各部位の座標データ
- ② Kinect による顔面認識情報を付加した可視画像

(3) 計測結果

Kinect と被験者との距離による Kinect 成功率、cap 成功率の変化を表 5.2.1 に示す。また、この結果を、横軸に Kinect と被験者の距離、縦軸に Kinect 成功率及び cap 成功率をとり表したグラフが図 5.2.2 である。

表 5.2.1 Kinect と cap の成功率[%]

距離 [cm]	Kinect			cap		
	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]
50	174	82	47.1	132	0	0
100	4369	4295	98.3	134	124	92.5
150	4681	4564	97.5	133	127	95.5
200	4696	4624	98.5	134	127	94.8
250	4732	4627	97.8	133	131	98.5
300	4667	4571	97.9	133	132	99.2
350	4694	4599	98.0	132	129	97.7
400	4704	4612	98.0	133	132	99.2
450	4562	57	1.25	132	0	0.00

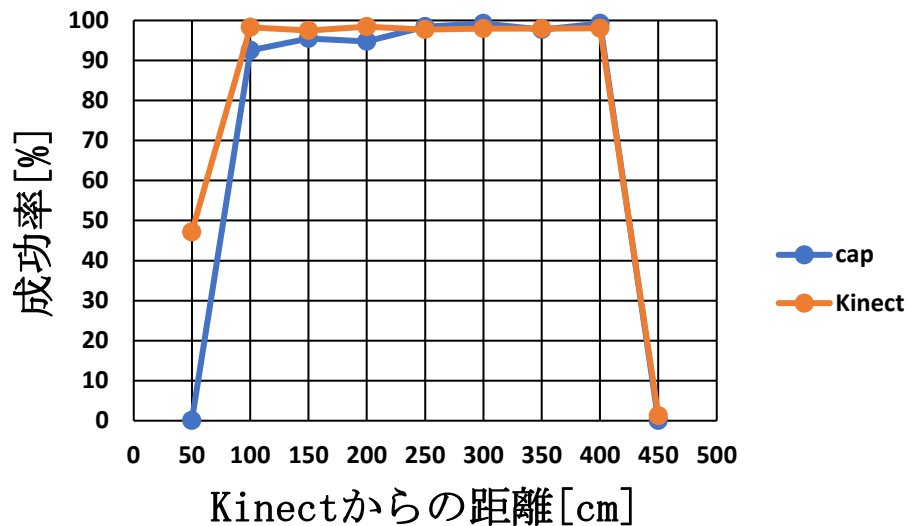


図 5.2.2 Kinect と cap の成功率の距離変化

(4) 検証結果

Kinect の顔認識の距離範囲は、動作仕様の人の検出距離範囲よりやや狭く、100cm~400cm ほどであることが分かった。またその範囲内であれば顔認識の精度に大きな変化がないことも分かった。

5.3 顔の角度変化による Kinect の顔認識への影響

Kinect を実船で使用する上では、様々な航海計器の使用の邪魔にならない、操船者の視界を制限しない、つまり見張り作業の邪魔にならない場所にセンサーを設置場所する必要がある。つまり、操船者の正面かつ目線の高さに Kinect センサーを設置することは不可能である。そこで、被験者の顔の向きによって Kinect による顔認識の精度がどのように変化するか調べた。

(1) 実験方法

実験は室内で行い、日光の影響を受けないようにブラインドを閉めて行った。Kinect は被験者から水平距離 2.0m の場所に設置し、Kinect を設置する高さは図 5.3.1 のように顔の垂直角度が 0° (1.6m)、上に 15° (2.1m)、下に 15° (1.1m) の 3 パターンで検証した。Kinect が顔の上方向、または下方向にある場合は Kinect が被験者の顔に向くよう、Kinect 自体の角度を変えて実験を行った。また、被験者の顔の向きは真正面から水平角度 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° の 7 パターンで検証した。顔の向きが真横、つまり 90° の場合でも実験をしたが、Kinect の顔認識機能が全く反応しなかったため、 90° におけるデータ取得率は 0% となっている。

本実験では、被験者が顔の向きを変える際に、顔のみを動かす場合と体ごと顔を動かし向きを変える場合の 2 つのパターンで検証を行った。

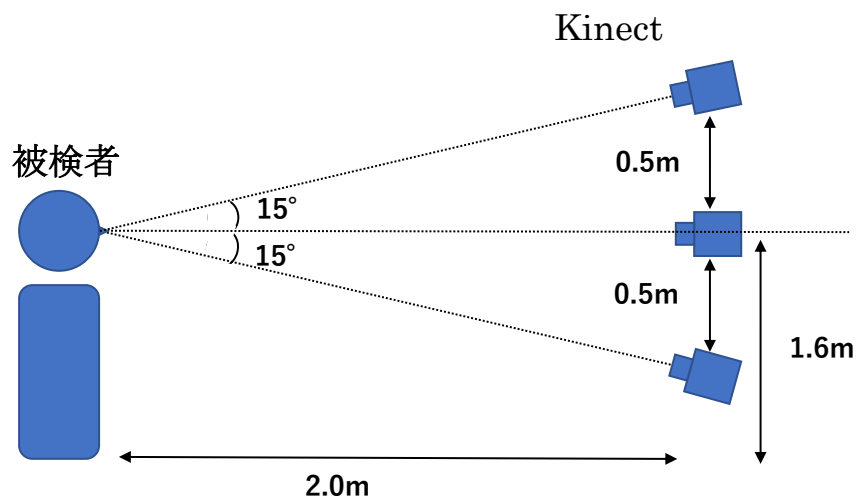


図 5.3.1 実験時の Kinect の設置位置

(2) 計測項目

本実験の計測項目は以下の2つである。

- ① Kinectにより取得した顔の各部位の座標データ
- ② Kinectによる顔面認識情報を付加した可視画像

(3) 計測結果

顔の水平角度及び垂直角度の変化による Kinect の顔認識結果を表 5.3.1～表 5.3.4 に示す。またそれぞれの結果を、横軸に顔の水平角度、縦軸に Kinect 成功率及び cap 成功率をとり表したグラフが図 5.3.2～図 5.3.5 である。

① 顔のみを動かした場合

表 5.3.1 Kinect 成功率[%]

	正面			上 15°			下 15°		
	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]
0°	4368	4638	100	4278	4278	100	4441	4441	100
15°	3197	3197	100	3228	3227	100	3354	3330	99.3
30°	4233	4233	100	4283	4283	100	4096	4093	99.9
45°	3393	3277	96.6	4264	4250	99.7	4227	3240	76.7
60°	4391	2555	58.2	4263	2692	63.1	4241	2141	50.5
75°	2841	1558	54.8	2965	1552	52.3	3003	1022	34.0
90°	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00

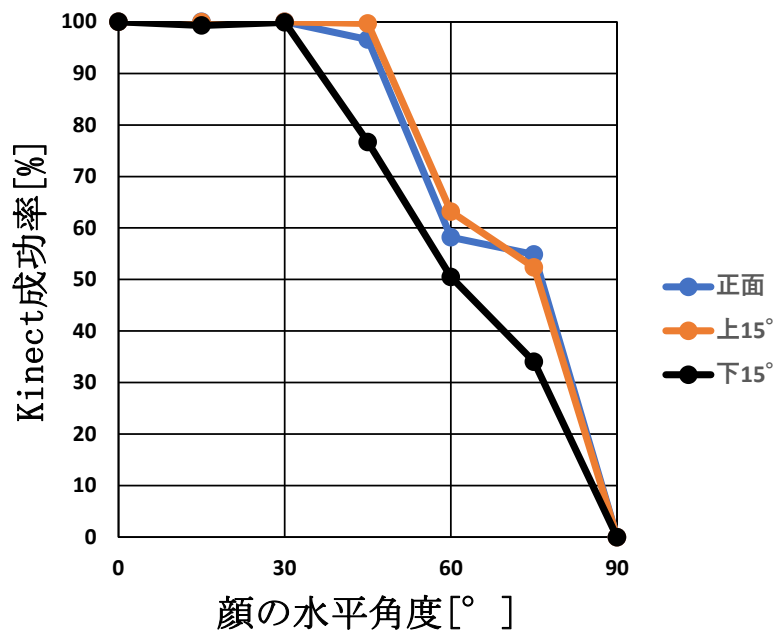


図 5.3.2 Kinect 成功率

表 5.3.2 cap 成功率[%]

	正面			上 15°			下 15°		
	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]
0°	131	131	100	131	130	99.2	131	130	99.2
15°	132	132	100	132	132	100	135	135	100
30°	129	126	97.7	132	131	99.2	132	128	97.0
45°	133	119	89.5	132	131	99.2	131	89	67.9
60°	133	33	24.8	130	83	63.8	132	36	27.3
75°	87	17	19.5	110	57	51.8	84	17	20.2
90°	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00

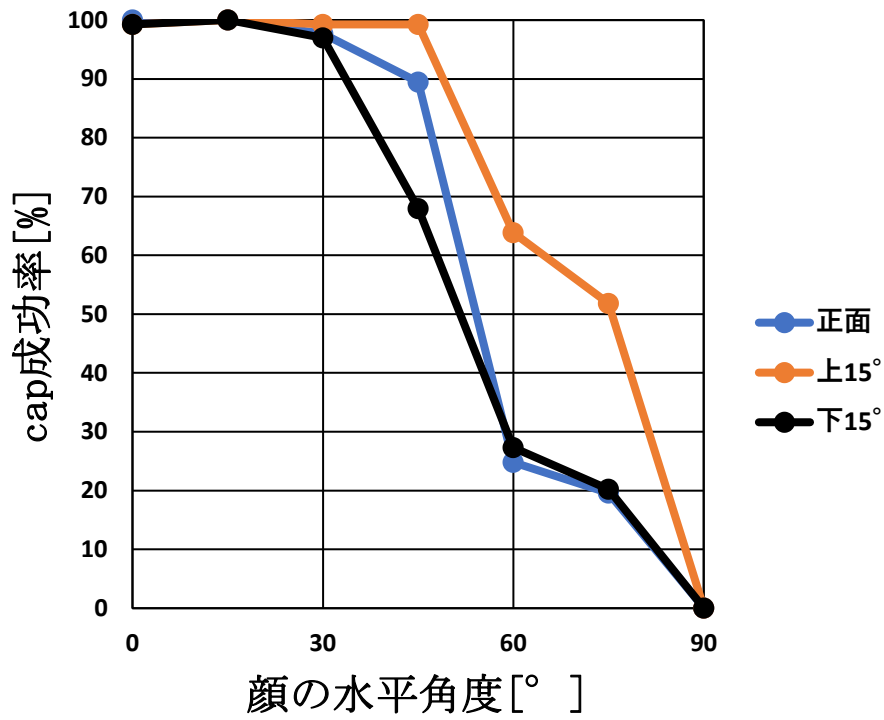


図 5.3.3 cap 成功率

② 体ごと顔を動かした場合

表 5.3.3 Kinect 成功率[%]

	正面			上 15°			下 15°		
	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]
0°	4368	4368	100	4278	4278	100	4441	4441	100
15°	4132	4132	100	4180	4177	99.9	4067	4021	98.9
30°	4139	4137	100	4255	4255	100	3880	3865	99.6
45°	4072	3752	92.1	4298	4298	100	4108	2915	71.0
60°	4075	2502	61.4	4399	1938	44.1	4151	2202	53.0
75°	1993	1119	37.4	4228	1180	27.9	3987	1003	25.2
90°	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00

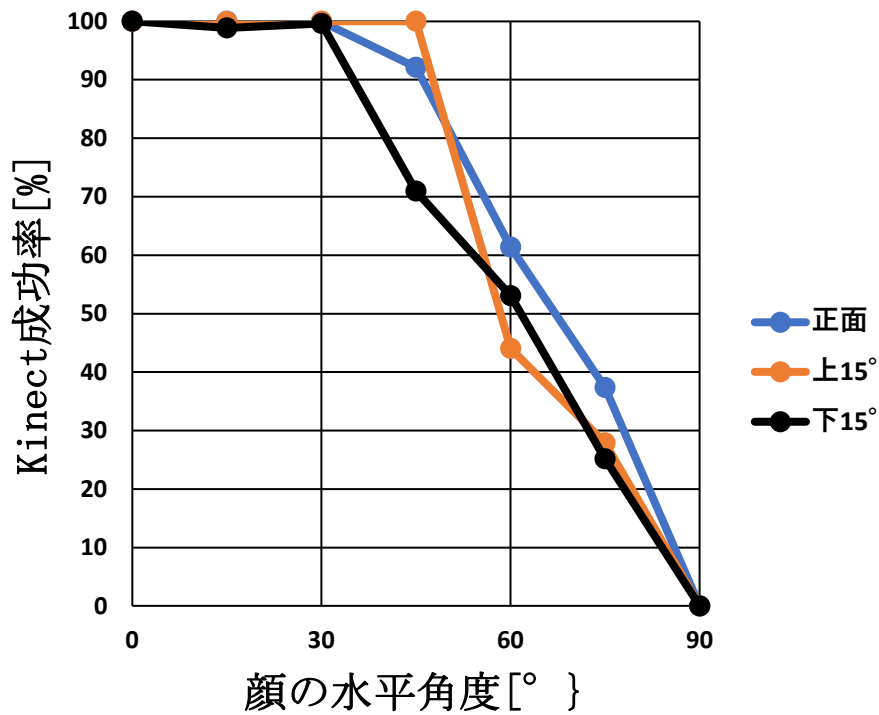


図 5.3.4 Kinect 成功率

表 5.3.4 cap 成功率[%]

	正面			上 15°			下 15°		
	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]
0°	131	131	100	131	130	99.2	131	130	99.2
15°	129	122	94.6	127	125	98.4	130	130	100
30°	131	131	100	131	129	98.5	129	129	100
45°	131	116	88.5	131	130	99.2	129	79	61.2
60°	131	20	15.3	132	57	43.2	131	8	6.10
75°	88	10	11.4	80	17	21.3	85	4	4.70
90°	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00

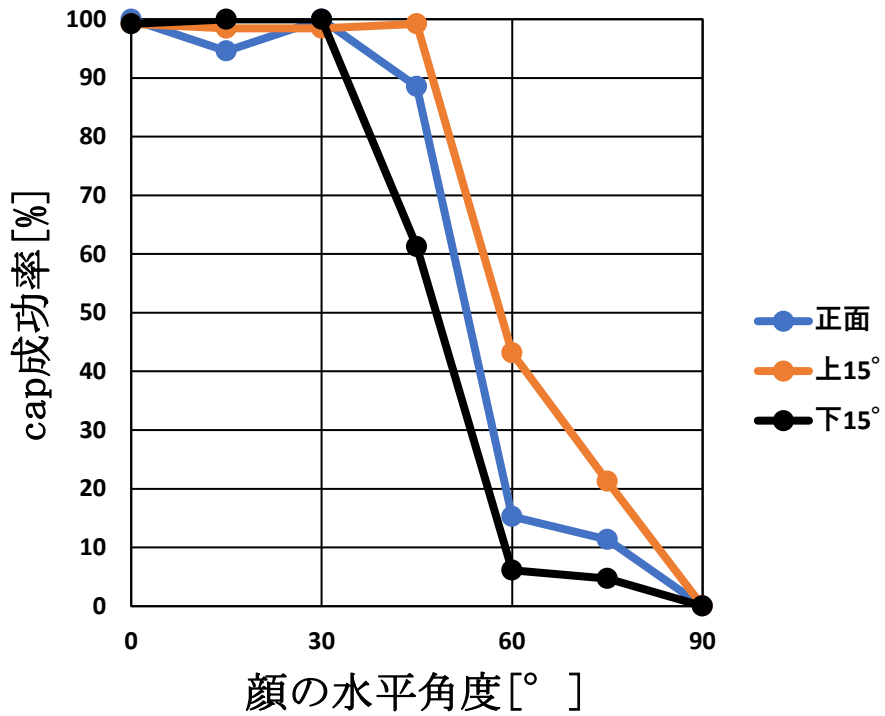


図 5.3.5 cap 成功率

(4) 検証結果

① 顔の角度による違い

顔の水平角度に着目すると、顔の水平角度が正面から 45° 以下の範囲であれば安定してデータを取得できている。しかし顔の水平角度が正面から 60° 以上になると急激にデータ取得の成功率が落ちている。また顔の水平角度が 90° の時、つまり真横を向いている時は Kinect が顔を認識することはなかった。

② 顔の動かし方による違い

顔のみを動かした場合と体ごと顔を動かした場合を比べると、顔の水平角度が 45° 以下ではほとんど差異はないように見える。しかし顔の水平角度が正面から 60° 以上になると、顔のみを動かした場合の方が、Kinect 成功率、cap 成功率共に高いことが多いと分かる。これより、Kinect が顔認識を行う際に顔の情報だけでなく、肩や腕の位置といった骨格の情報も取り入れている可能性があると考えられる。そのため肩などの骨格が左右両方とも Kinect に認識される状況にある、顔のみを動かした場合の方が、認識精度が安定したと考えられる。

③ Kinect の高さによる違い

Kinect を設置する高さで比較すると、全体的に顔の垂直角度が上に 15° の位置に設置した場合にデータ取得の成功率が高いことが分かった。

5.4 Kinect の顔認識の角度限界

一般的に操船者は船橋の前部で見張り作業を行っており、本システムで見張り当直中の操船者の心的負荷を計測するためには、船橋前部に居る操船者を Kinect で撮影する必要がある。また、操船者の見張り作業の邪魔にならないように、船橋前面の上部、もしくは下部に設置することが望ましい。そこで、Kinect の垂直方向の顔認識精度について検証した。

(1) 実験方法

実験は室内で行い、日光の影響を受けないようにブラインドを閉めて行った。実験時の被験者と Kinect の位置関係を図 5.4.1 に示す。Kinect は被験者の鼻の高さ(160cm)を基準として、上部、下部共に 100cm ずつ離して設置した。Kinect は図 5.4.2 のように視線の高さから垂直下方向に最大約 30° 、上方向に最大約 12° に傾けることができる。そのため Kinect を上部に設置する時は下方向に 30° 、上方向に 12° 傾けて設置した。そして、Kinect と被験者の距離 Xcm を変化させ、その際の垂直角度 α 、 β を求めた。

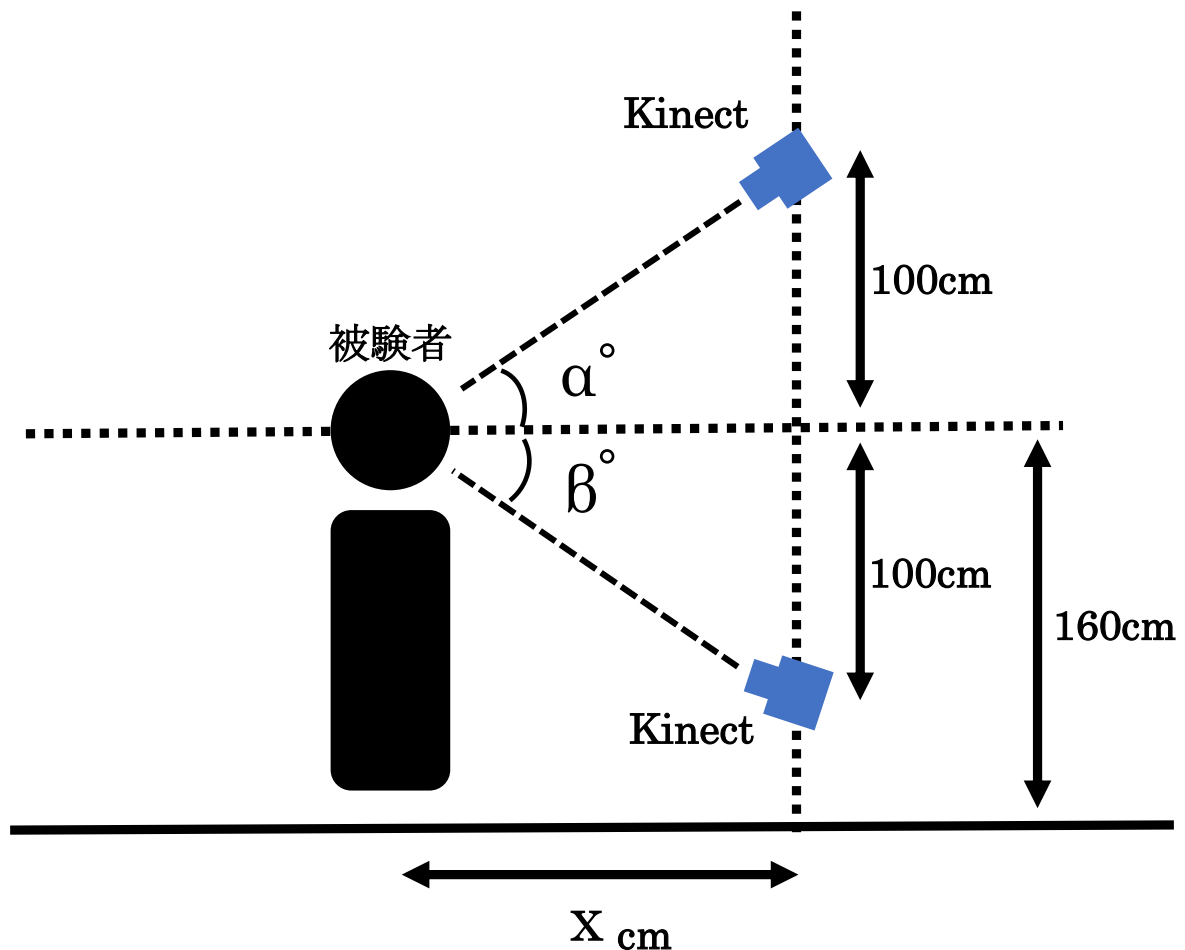
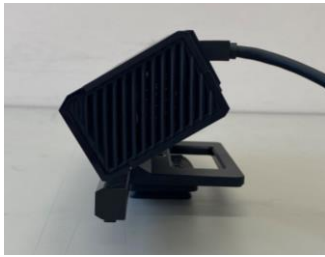


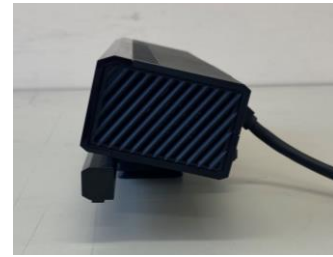
図 5.4.1 実験時の様子



下方向(約30°)



正面(0°)



上方向(約12°)

図 5.4.2 Kinect を傾けることができる最大角度

(2) 計測項目

本実験の計測項目は、以下①から③の3項目である。

- ① 被験者と Kinect の水平距離
- ② Kinect により取得した顔の各部位の座標データ
- ③ Kinect による顔面認識情報を付加した可視画像

(3) 計測結果

計測結果を表 5.4.1、表 5.4.2 に示す。この結果を。横軸に Kinect と被験者の水平距離、縦軸に Kinect 成功率及び cap 成功率をとり表したグラフが図 5.4.3、図 5.4.4 である。

- ① Kinect を上部に設置した場合

表 5.4.1 Kinect と cap の成功率の距離変化

距離 [cm]	Kinect 角度[°] (α°)	Kinect			cap		
		取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]
80	51.3	0	0	0.00	90	0	0.00
90	48.0	2979	2020	67.8	87	26	29.9
100	45.0	2872	2531	88.1	86	39	45.3
110	42.3	2773	2615	94.3	88	67	76.1
120	39.8	2473	2410	97.5	88	80	90.9

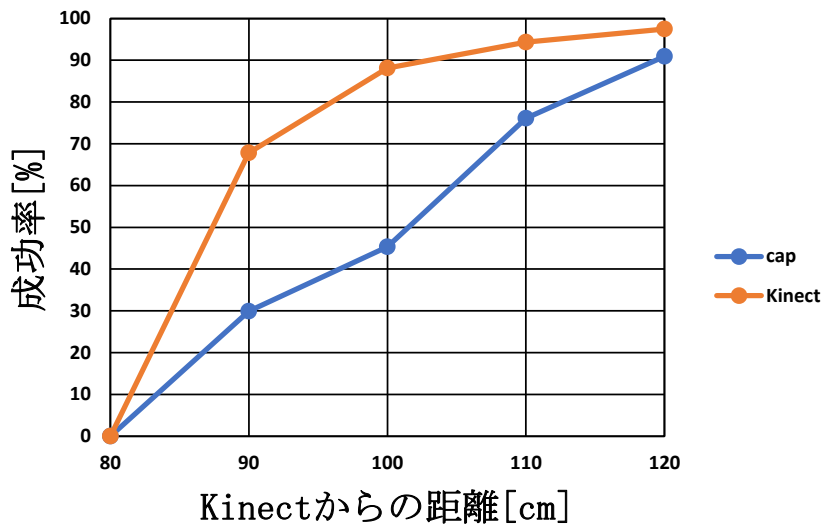


図 5.4.3 Kinect 成功率と cap 成功率の距離変化

② Kinect を下部に設置した場合

表 5.4.2 Kinect と cap の成功率の距離変化

距離 [cm]	Kinect 角度[°] (β°)	Kinect			cap		
		取得数 [個]	成功数 [個]	成功率 [%]	取得数 [枚]	成功数 [枚]	成功率 [%]
120	39.8	2423	961	39.7	90	0	0
130	37.6	2773	2719	98.1	92	87	94.6
140	35.5	2811	2788	99.2	93	90	96.8

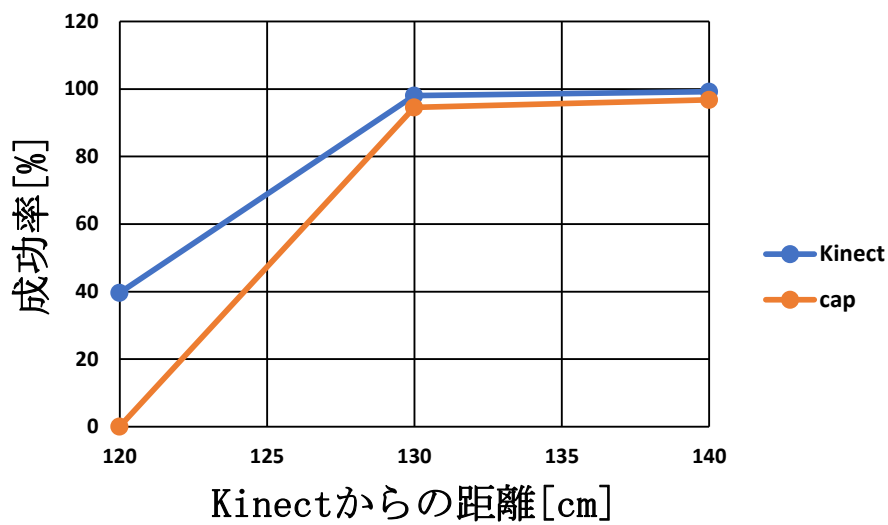


図 5.4.4 Kinect 成功率と cap 成功率の距離変化

(4) 検証結果

- ① Kinect を上部に設置する場合は被験者との垂直角度が 45° 以下、下部に設置する場合は被験者との垂直角度が約 38° 以下となる場所で顔認識精度が高いことが分かった。
- ② 図 5.4.5 に Kinect を上部に設置し、被験者との水平距離が 80cm の時の cap 画像を示す。この図のように、Kinect が眉毛を目、鼻の端を鼻の先端、鼻の穴の位置を口の両端と誤認識するケースが多くみられた。このことから Kinect が顔認識する際には色の情報を取り入れている可能性があると考えられる。
- ③ 図 5.4.6 に Kinect を下部に設置し、被験者との水平距離が 120cm の時の cap 画像を示す。Kinect の画像上に目が映っていない場合、Kinect が正確に鼻の位置を認識することはほとんどなかった。しかしこのような場合でも、正確な位置ではないが目や鼻の位置を特定している。このことから Kinect は顔のパーツの一部を認識することで、他のパーツの位置を予測して特定していると分かる。また、Kinect を下部に設置した場合は図 5.4.7 のように Kinect の画像上に被験者の両目、鼻、口の両端の 5 点全てが映る場合は、十分なデータ取得の成功率になることが分かった。

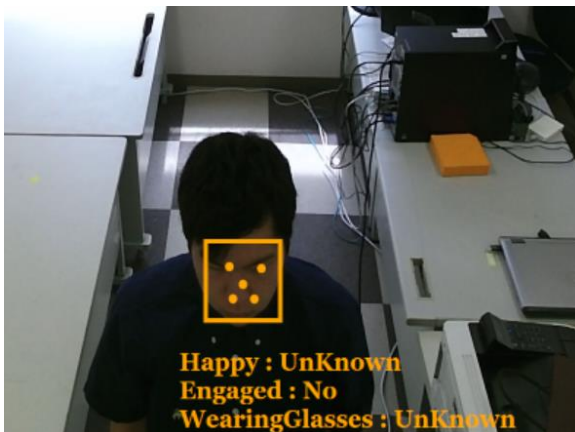


図 5.4.5 Kinect を上部に設置した際の cap 画像

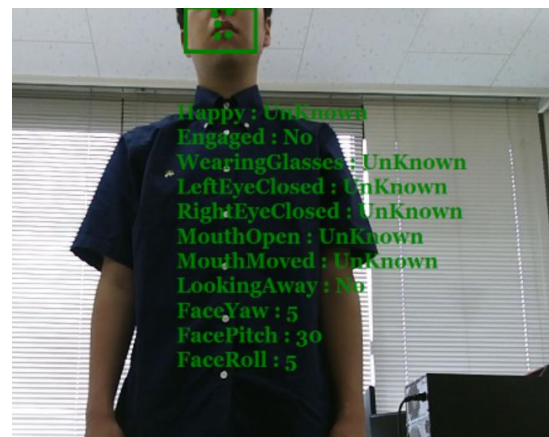


図 5.4.6 Kinect を下部に設置した際の cap 画像①



図 5.4.7 Kinect を下部に設置した際の cap 画像②

5.5 Kinectの顔認識と体の情報との関連性

Kinectの顔認識と顔の角度についての検証の際に、Kinectは顔認識の際に骨格の情報も取り入れている可能性が考えられた。船橋にはエンジンコンソールやコントロールパネル等の機器が設置されているため、Kinectの設置場所によっては、操船者の体の一部がKinectに映らない可能性がある。そこで、被験者の体の一部がKinectに映らない場合、Kinectの顔認識の精度にどのような影響があるかを調べた。

(1) 実験方法

実験は室内で行い、日光の影響を受けないようにカーテンを閉めて行った。図5.5.1に示すように、被験者の前に障害物を置き、被験者の首から下の部分がKinectに映らない状態で、Kinectの撮影を開始した。そして障害物を少しずつ取り除き図5.5.2のような顔に加えて両肩が移るように、その後に両腕も映るようにして実験を行った。

(2) 計測項目

Kinectによる顔面認識情報を付加した可視画像

(3) 検証結果

計測の結果、Kinectは顔のみが映るような状態では顔認識ができないということが分かった。そしてKinectが顔認識をするためには、最低でも顔、両肩、両腕が映らなければならないことが分かった。また、一度顔認識をした後で、再度両肩と両腕を障害物で隠した際には、図5.5.4のように問題なく顔が認識された。これよりKinectは顔認識をする際、過去に認識した顔面認識情報も参考に行っている可能性があると考えられる。



図 5.5.1 顔のみが映る状態



図 5.5.2 顔と両肩が映る状態



図 5.5.3 顔と両肩、両腕が映る状態



図 5.5.4 顔認識後に両肩、両腕を隠した状態

5.6 Kinect を上下逆さに設置した際の影響

船橋における Kinect の設置場所は、操船者による航海計器の使用や見張り作業を妨げない場所でなければならない。操船者の上半身を含めた撮影を検討した場合、Kinect の設置場所の一つとして船橋の天井が考えられた。Kinect 本体の底面には、三脚等に取り付けるためのアダプターを装着できるようになっている。このアダプターを使用し船橋の天井に Kinect を設置した場合、Kinect を上下逆さにして使用する形になる。そのため Kinect が図 5.6.1 のように上下逆さの状態でも、顔認識に影響がないかどうかを検証した。その結果、Kinect を上下逆さにした場合は正面かつ適切な距離からの撮影であっても、顔を認識することはなかった。したがって、Kinect は天井から上下逆さの向きに設置することができないことが明らかとなった。



図 5.6.1 Kinect を上下逆さに設置した時の様子

第6章 実船実験

6.1 調査・研究船やよい

本研究では、東京海洋大学の調査・研究船やよい（以下やよい）を使用して実験を行った。やよいの写真を図 6.1.1、主要要目を表 6.1.1 に示す。

実験時の船橋内に設置したセンサーやカメラ等の位置関係について、簡易的な見取り図を図 6.1.2、実際の船橋内の様子を図 6.1.3 に示す。ビデオカメラ①及び②は本船周辺の状況確認のため、ビデオカメラ③は被験者の行動・言動の確認のために設置した。船橋は椅子に座って操船するタイプのものとなっているため、右舷側の椅子に座った状態の被験者を計測することになる。船橋前面の Kinect、赤外線センサー、およびビデオカメラは、事前にやよい船長（本実験の被験者）に口頭によるヒアリングを行い、見張り作業や操船の邪魔にならない場所を検討した上で設置した。第5章で示した通り Kinect と被験者の位置関係として、距離は 100cm～400cm、顔の水平方向の角度は 45 度以下、顔の垂直方向の角度は 30 度以下が望ましい。本実験で設置した Kinect の位置は、被験者からの距離が約 160cm、顔の垂直方向の角度が約 8 度であるが、船橋内の器具や見張り作業妨げになってしまう関係上、顔の水平方向の角度は約 48 度であった。



図 6.1.1 調査・研究船やよい

表 6.1.1 やよいの主要目

全長	17.80m
登録長	15.91m
幅 (型)	4.28m
深さ (型)	1.49m
計画喫水	0.94m
総トン数	19 トン

主機関	船用高速ディーゼル 675PS×2 基
速度	約 23kt

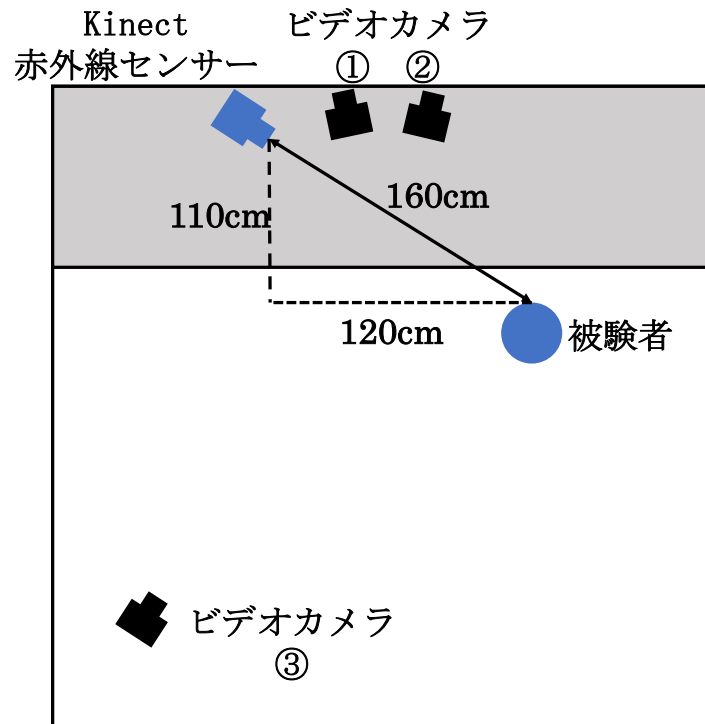


図 6.1.2 船橋内の見取り図

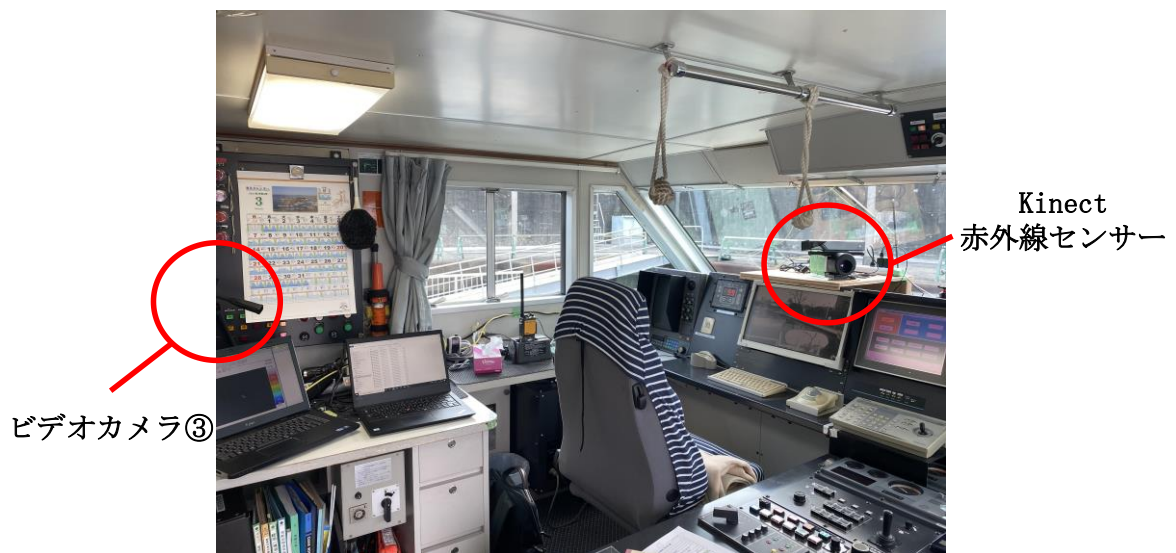


図 6.1.3 実際の船橋内の様子

6.2 実験概要

(1) 実験シナリオ

実験は操船者に最も心的負荷がかかると考えられる入港へのアプローチ・着岸操船時に実施した。操船者には入出港の操船船を繰り返し行わせ、Kinect 及び赤外線カメラによる計測を 2 回行った。1 回の計測時間は約 3 分間であった。実験時のやよいの航跡を図 6.2.1 に示す。

(2) 実験手順

- ① 被験者には実験前に実施内容を十分に説明し、鼻部皮膚温度等の生理データの計測及び可視カメラによる撮影等のデータ収集、また実験で得られるデータを研究に使用するについて同意を得た。被験者説明の主な内容を下記に示す。
 - 実験の様子をビデオカメラ、Kinect、赤外線センサーで撮影・記録する
 - 実験時は通常の見張り作業、入港・着岸作業を行う
 - 実験は被験者の同意が得られない場合には実施しない
- ② 操船者の見張り作業や操船の邪魔にならない位置を検証し、Kinect 及び赤外線センサーを適切な位置に設置する
- ③ 被験者へ実験内容について疑問点がないかを最終確認し、本実験を行う
- ④ 全実験終了後、被験者の安静時のデータを約 2 分間取得する

6.3 実験被験者

被験者は、3 級海技士（航海）及び小型船舶操縦士一級の資格を所有している 40 代男性である。乗船歴は本実験で使用した「やよい」よりも一回り大きい、総トン数 425 トン、全長 49.9m の船舶（練習船）で 22 年間乗船し、その後、やよいの船長を 2 年経験している。やよいは月に平均 2 回ほどの頻度で運航しており、今回の実験を行った海域は、通常のやよい運航ルートに含まれているため、被験者が操船に十分に慣れている海域である。

6.4 計測項目

(1) Kinect による鼻部座標データの取得

第 4 章の表 4.1.5 で一例を示した Kinect データの中から、データ取得時刻（時・分・秒・ミリ秒）・鼻と額の XY 座標のデータを取得した。

(2) 赤外線センサーによる温度データの取得

本研究では第 4 章の図 4.1.9 に示したような赤外線画像を取得したが、赤外線センサー付属の専用ソフトを用いることで、図 6.4.1 のようにピクセル毎の温度が数値で確認できる Excel データに変換することができる。この Excel データは設定した計測時間毎にシートが分かれており、ピクセル毎の温度の他に、測定日付、測定時間、赤外線センサーで取得できる温度の最大値（Tmax）と最小値（Tmin）、レンジ、放射率、イメージモード、外部レンズ、開始座標、終了座標が記載されている。放射率とは、物質の表面から赤外線エネルギーを放射させる度合いを数値化したもので 0 から 1 の間の数値で表される。

赤外線センサーの測定間隔は 1 秒、1/5 秒、1/10 秒、1/15 秒、1/30 から選択できる。先行研究で、室内における操船シミュレータ実験の被験者を測定間隔 1 秒で測定したところ、約 87% の割合で正常に測定することができた[61]。そのため一回目の実験で

は測定間隔 1 秒で実験を行った。しかし、一回目の実験中に取得した赤外線画像を確認したところ、図 6.4.2 のように画像上に横線が入り、正常な画像つまり温度データを取得できていないことが多かった。このような画像の場合、Kinect から正確な鼻の位置を取得できたとしても、赤外線画像上の鼻の位置がずれる可能性があるため、被験者の鼻部皮膚温度を正確に取得することができない。そこで、二回目の実験では赤外線画像の測定間隔を 1/30 秒にして測定を行うこととした。

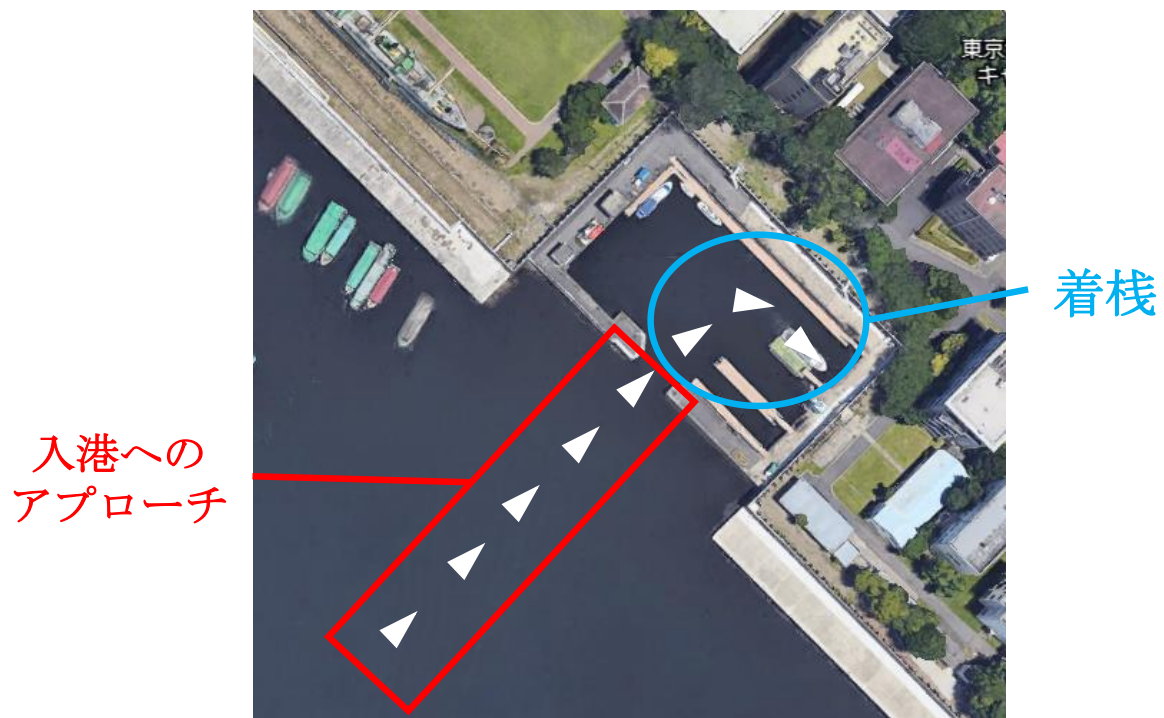


図 6.2.1 実験時のやよいの航跡図

熱画像データ												
1	2021.3.9_09.svt											
2	測定日付	021/03/09		レンジ	1							
3	測定時間	11:00:25		放射率	1.00							
4	T.max	120.0		イメージモード	OFF		開始座標	0,0				
5	T.min	-40.0		外部レンズ	オフショツクスG		終了座標	319,239				
6												
7												
8												
9	x/y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0	24.0	24.2	24.2	24.1	24.1	24.0	23.9	23.9	23.9	23.7	23.7
11	1	23.9	23.9	24.0	24.0	23.8	23.9	23.8	23.7	23.7	23.8	23.8
12	2	23.6	23.7	23.9	23.8	23.8	23.9	23.8	23.9	23.7	23.7	23.8
13	3	23.4	23.5	23.6	23.7	23.8	23.7	23.7	23.7	23.6	23.7	23.7
14	4	23.2	23.2	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.5	23.5
15	5	22.9	23.0	23.1	23.2	23.2	23.3	23.2	23.3	23.2	23.4	23.4
16	6	22.9	22.8	22.9	23.0	22.8	22.8	22.9	23.1	23.2	23.1	23.2
17	7	23.0	22.8	22.7	22.7	22.8	22.8	22.6	22.9	22.7	23.0	23.1
18	8	22.8	22.8	22.8	22.5	22.6	22.6	22.6	22.7	22.8	22.7	22.9
19	9	22.8	22.6	22.7	22.6	22.6	22.5	22.5	22.4	22.6	22.6	22.7
20	10	22.7	22.7	22.6	22.5	22.5	22.3	22.3	22.2	22.2	22.3	22.4
21	11	22.7	22.7	22.6	22.6	22.4	22.5	22.2	22.3	22.2	22.3	22.2
22	12	22.6	22.5	22.7	22.5	22.5	22.3	22.2	22.2	22.1	22.0	22.1
23	13	22.5	22.6	22.6	22.5	22.4	22.1	22.3	22.2	22.1	22.2	22.0
24	14	22.6	22.6	22.7	22.5	22.4	22.3	22.3	22.2	22.0	21.9	22.1
25	15	22.6	22.6	22.5	22.5	22.4	22.4	22.2	22.3	22.2	22.1	22.1
26	16	22.6	22.6	22.6	22.5	22.4	22.2	22.3	22.5	22.0	22.0	22.1
27	17	22.6	22.6	22.7	22.5	22.5	22.3	22.3	22.2	22.1	22.2	22.1
28	18	22.6	22.6	22.5	22.5	22.5	22.2	22.2	22.3	22.1	22.0	22.1
29	19	22.7	22.5	22.6	22.3	22.3	22.4	22.3	22.3	22.1	22.1	22.0
30	20	22.6	22.5	22.6	22.3	22.4	22.2	22.3	22.2	22.2	22.0	22.1
31	21	22.5	22.6	22.5	22.6	22.4	22.3	22.3	22.2	22.2	22.1	22.0
32	22	22.6	22.7	22.5	22.5	22.5	22.5	22.3	22.2	22.2	22.1	22.0
33	23	22.7	22.6	22.6	22.5	22.6	22.3	22.2	22.2	22.2	22.2	22.1
34	24	22.6	22.5	22.6	22.5	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3	22.1	22.0

図 6. 4. 1 赤外線画像から変換した Excel データ

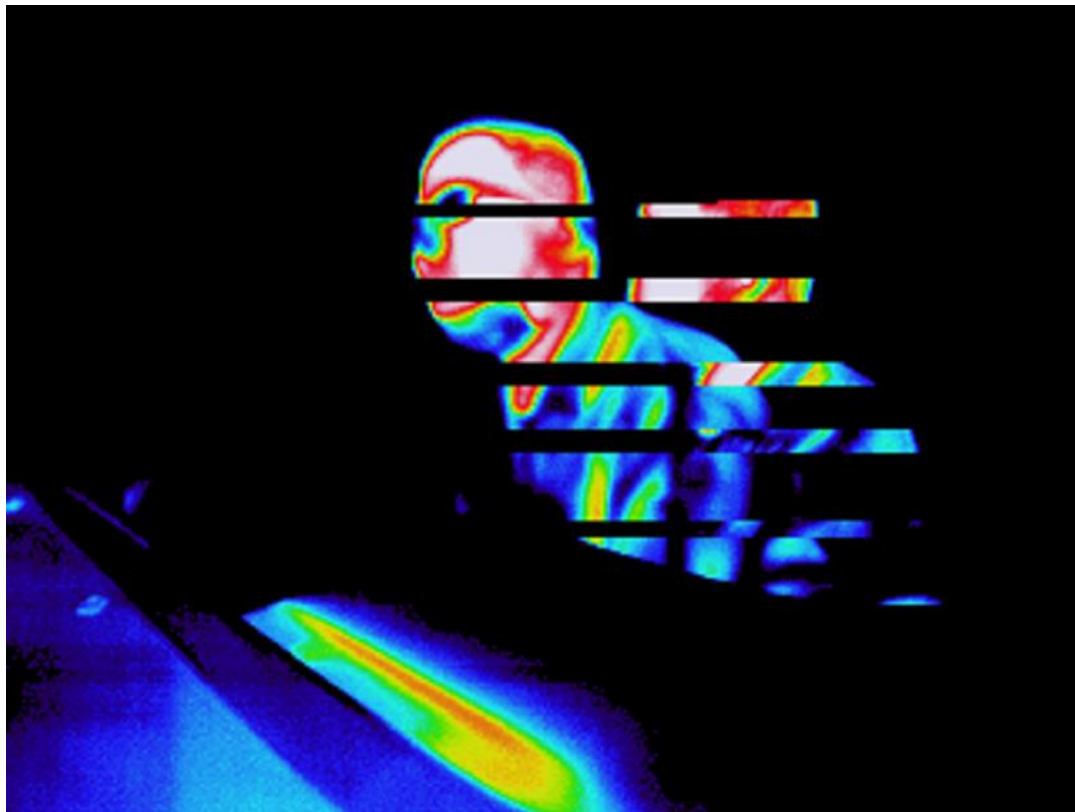


図 6. 4. 2 測定間隔 1 秒で取得した赤外線画像

(3) Kinect による顔認識情報を付加した可視画像

実験中に Kinect が被験者の顔認識情報を正しく取得できているかどうかを確認するため、第 4 章で述べた通り WinShot というフリーの画面キャプチャソフトを用いて、Kinect が表示できる顔認識情報を付加した可視画像を 1 秒毎にキャプチャ保存した。図 4.1.6 は実験時に取得した画像の一例である。

(4) ビデオデータ

実験時の本船の周囲の状況や、被験者の行動・言動を記録するために、ビデオカメラにより実験時の様子を撮影した。具体的な設置位置は図 6.1.3 の通りであり、船橋前面のビデオカメラ①と②は本船周辺の状況確認のため、船橋左舷側後方のビデオカメラ③は被験者の行動・言動の確認のために設置した。このビデオカメラは 3 つとも SONY 製のデジタル HD ビデオカメラレコーダー (HDR-CX680) を用いた。ビデオカメラの動作仕様を表 6.4.1 に示す。また、アプローチ操船時にそれぞれのビデオカメラで撮影された映像を図 6.4.3～図 6.4.5 に示す。正船首方向の防波堤内が着桟場所である。

表 6.4.1 ビデオカメラの主な動作仕様

イメージセンサー		1/5.8 型 Exmor R CMOS センサー
総画素数		251 万画素
記録画素数	静止画時	最大 920 万画素相当
有効画素数	動画時	229 万画素(16:9)
	静止画時	229 万画素(16:9)、171 万画素(4:3)
レンズ		G レンズ
フィルター径		46mm
F(焦点距離)		f=1.9-57.0mm
F(35mm 換算)	動画時	f=26.8-804.0mm(16:9 時)
	静止画時	f=26.8-804.0mm(16:9 時) f=32.8-984.0mm(4:3 時)
ズーム	動画時	光学 30 倍(デジタル 350 倍) 全画素長改造 60 倍
	静止画時	光学 30 倍(デジタル 350 倍)
最短撮影距離		約 1cm(ワイド端)、約 80cm(テレ端)



図 6.4.3 ビデオカメラ①で撮影されたやよいの左舷前方の映像



図 6.4.4 ビデオカメラ②で撮影されたやよいの右舷前方の映像



図 6.4.5 ビデオカメラ③で撮影された船橋内と被験者の映像

第7章 鼻部皮膚温度の自動計測結果

7.1 実験結果

第6章でも述べた通り、実船実験では被験者に一回約3分の入港・着棧操船を二回行ってもらった。しかし一回目の入港・着棧は、赤外線画像のフレームレートに問題があることが確認されたため、鼻部皮膚温度の自動計測結果としては、二回目の入港・着棧操船におけるデータで結果を用いることとした。実際に二回目の入港・着棧操船で得られた鼻部皮膚温度の時間的変化を図7.1.1に示す。図7.1.1の縦軸は取得した温度(°C)、横軸はKinectが実験開始後初めて顔認識をし、データを取得した時間からの経過時間(以下実験時間)(s)となっている。二回目の実験は166秒間でデータ数は1900個であった。

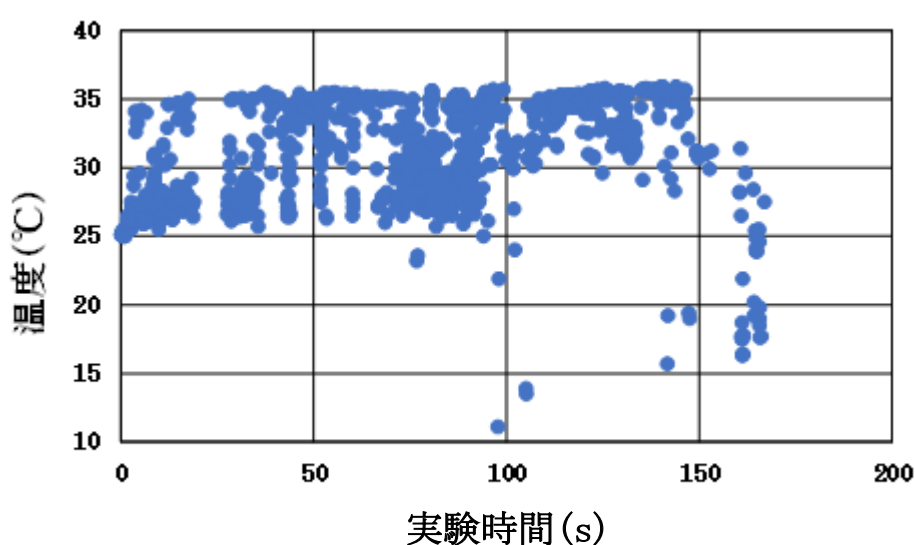


図 7.1.1 実船実験における鼻部皮膚温度の時間的変化

図7.1.1より、被験者の鼻部皮膚温度は変化が激しく、10°Cや20°Cなど、人間の体温としては考えにくい値が現れていることが分かる。この原因として、Kinectが被験者の鼻の位置を誤認識し、鼻の位置ではない場所の温度を取得してしまっていることが考えられた。そこで、誤認識データを自動で判定し正確に鼻部皮膚温度データとするために、フィルターで外れ値を取り除く作業を行った。具体的には、①鼻部皮膚温度の最大値によるフィルター、②鼻部皮膚温度の最小値によるフィルター、③前額皮膚と鼻部皮膚の温度差の最小値によるフィルターの3つのフィルターをかけることとした。この3つのフィルターをかけ、データが削除されなかったデータを正常値とした。計測された鼻部皮膚温度データに、3つのフィルターをかける流れを、図7.1.2に示す。

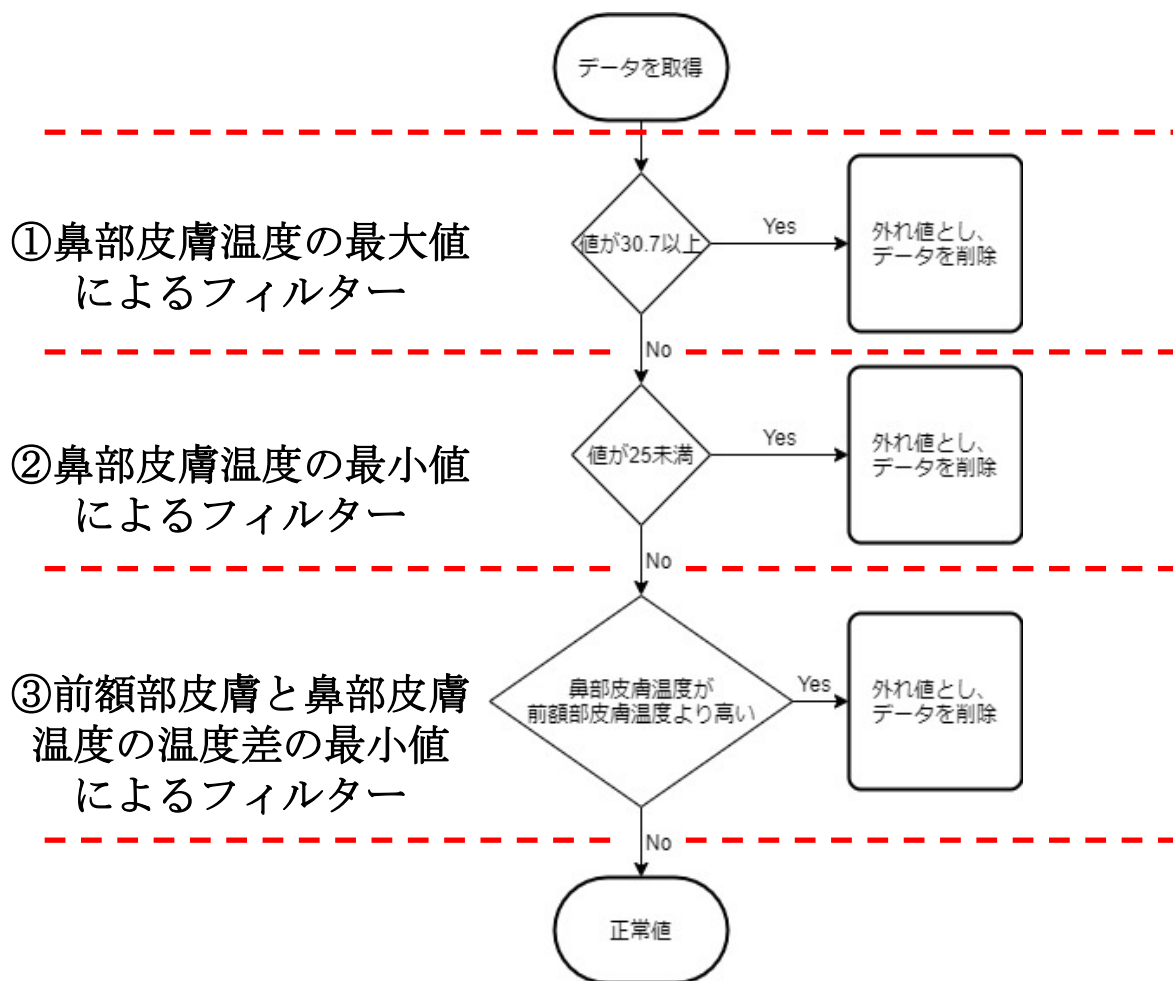


図 7.1.2 鼻部皮膚温度データの外れ値を取り除く流れ

① 鼻部皮膚温度の最大値によるフィルター

まず初めに鼻部皮膚温度の最大値を設定し、それ以上の値を取り除いた。人間の鼻部皮膚温度は心的負荷がかかると低くなることが知られている。そのため、安静時の被験者の鼻部皮膚温度より、実験時の鼻部皮膚温度が高くなることは考えにくい。そこで、安静時の被験者の鼻部皮膚温度の最大値である 30.6℃を、実験時の被験者の鼻部皮膚温度が取る可能性のある最大値とし、30.7℃以上の鼻部皮膚温度データを外れ値とすることにした。

② 鼻部皮膚温度の最小値によるフィルター

最大値と同様に、鼻部皮膚温度の最小値を設定し、外れ値を取り除いた。鼻部皮膚温度が心的負荷によって安静時の温度からどれほど下がるかは、心的負荷の度合いや個人差にもよるため、最大値と同様に安静時の鼻部皮膚温度を基準に最小値を設定することは難しい。そのため、今回は実験時に取得した赤外線画像を使用し、外れ値として現れる可能性のある場所の温度と、実際の被験者の鼻部皮膚温度を比較することで最小値を設定した。外れ値として現れる可能性のある場所とは、具体的には船橋内の壁面や被験者の眼鏡のレンズ、船外等が想定された。鼻部皮膚温度の最小値を決める際に使用した赤外線画像の一例を、図 7.1.3 に

示す。十字マークと小文字のアルファベット (a から e) は温度を調べた順番、数字は十字マークの位置の温度である。被験者の鼻部皮膚温度は 25.5°C 以上であり、Kinect が鼻の位置と誤認識する可能性の高い被験者の目の位置の温度は約 24.5°C であった。また被験者の顔から大きく外れた部分、具体的には船橋内の壁、カーテン、船外などは 24.0°C 未満であった。これらの結果から、実験時の被験者の鼻部皮膚温度が取り得る最小値を 25.0°C とし、 25.0°C 未満の温度を外れ値と定義した。

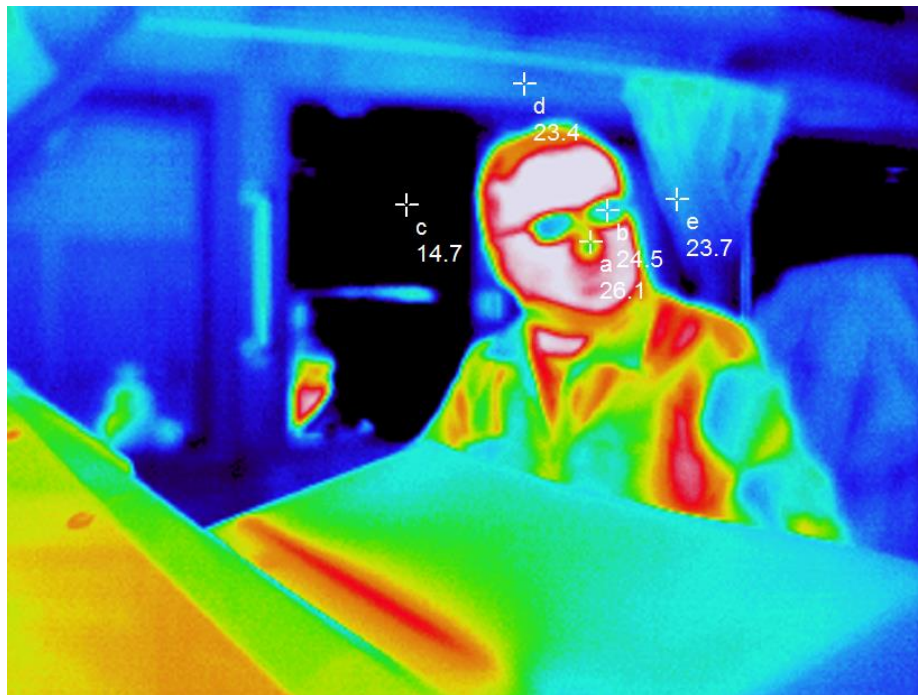


図 7.1.3 鼻部皮膚温度の最小値を決める際に使用した赤外線画像の一例

最大値と最小値の設定をして外れ値を除いた鼻部皮膚温度の時間的変化のグラフを図 7.1.4 に示す。図 7.1.1 に示した鼻部皮膚温度データの数が 1900 個であったのに対し、最大値と最小値のフィルターをかけた後のデータ数は 550 個に減少し、データ数の約 29% となった。この時点で、実験時間が約 90 秒までの区間と、後半の 90 秒以降の区間でデータ数に大きな差があることが分かった。この時間帯によるデータ数違いを調べたところ、実験時間 90 秒までの区間は、図 6.2.1 の航跡では防波堤外から防波堤を横切るまでの入港のアプローチ操船に該当する区間であり、後半の実験時間 90 秒以降は着棧操船に当たる区間であることが分かった。今回の実船実験は、防波堤を通過した後、右舷側にある着棧場所に入船右舷付けする必要があった。しかし、Kinect や赤外線センサーを設置した場所は図 6.1.2 に示す通り操船者の左側であった。そのため防波堤を過ぎた後、着棧の操船のために自船の右舷側を主に注視していた被験者の顔を Kinect が認識することが困難であったことが考えられる。なお、やよいの船橋では、Kinect の検知距離等の制約や操船への影響を考慮すると、図 6.1.2 に示す位置よりも右舷側（被験者正面寄り）にセンサーを設置することは困難であった。これらの理由から、本研究の分析では着棧操船の区間は含めず、あくまで入港のアプローチ操船時における鼻部皮膚温度の変化に注目することとした。

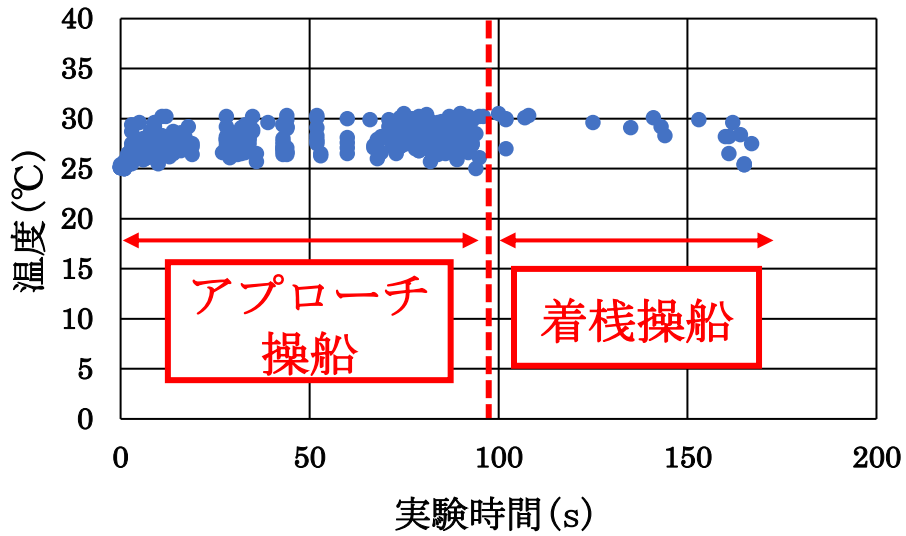


図 7.1.4 最大値と最小値のフィルター後の鼻部皮膚温度の時間的变化

③ 前額皮膚と鼻部皮膚の温度差の最小値によるフィルター

第 3 章で示した通り、前額皮膚温度は鼻部皮膚温度と比べて心的負荷の影響を受けにくく温度変化が少ないことが分かっている。そこで、前額皮膚と鼻部皮膚の温度差から鼻部皮膚温度の外れ値を取り除くこととした。

本研究で鼻部皮膚温度のデータ収集に使用したプログラムでは、Kinect は両目、鼻、口の両端の座標のみ取得することができ、前額部の座標を取得することはできない。そのため、Kinect により取得した両目と鼻の座標から前額部の座標を算出した。Kinect により取得した両目と鼻の座標から前額部の座標を算出方法について、図 7.1.5 に示す。図 7.1.5 のように、鼻の座標を右目の座標及び左目の座標（黒色の丸）を通る直線の中点で点対称とした位置（赤色の丸）を前額部として算出した。

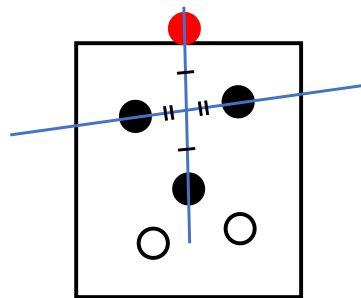


図 7.1.5 額の座標の算出方法

算出した前額部の位置と鼻部皮膚温度のデータを用いて、前額皮膚温度から鼻部皮膚温度を引いた温度差（以下、温度差）を求めた。温度差の時間的変化のグラフを図 7.1.6 に示す。図 7.1.6 の縦軸は温度差、横軸は実験時間である。第 3 章で述べた通り、心的負荷がかかると前額皮膚温度はあまり変化しないが、鼻部皮膚温度は低下する。したがって温度差に注目すると、温度差が大きい値であるほど心的負荷がかかっており、温度差が低い値で

あるほど心的負荷がかかっていないことが予想できる。しかし、温度差が負の値、つまり前額皮膚温度より鼻部皮膚温度の方が高くなるということは考えにくい。そこで本研究では、温度差が負の値である場合は、鼻部皮膚温度の外れ値であると定義することとした。

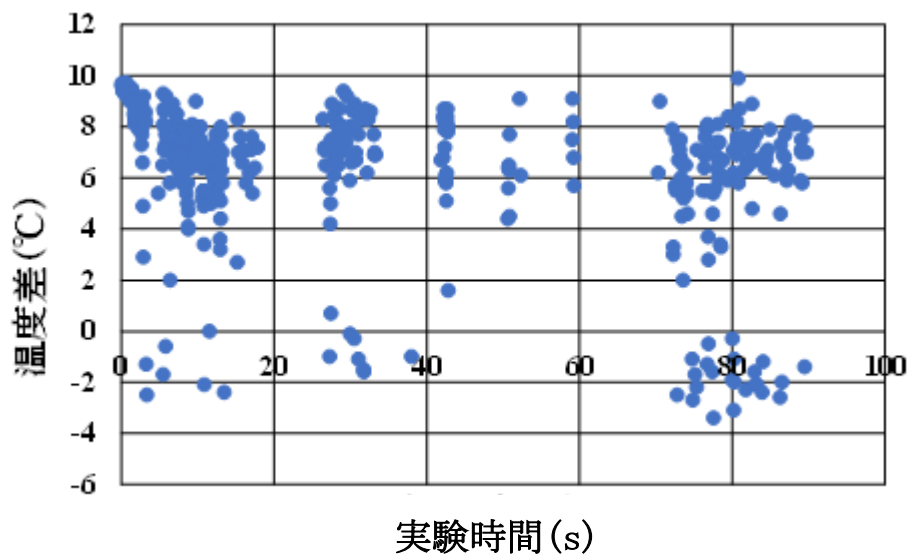


図 7.1.6 前額皮膚温度から鼻部皮膚温度を引いた温度差の時間的変化

鼻部皮膚温度の値だけに着目した場合、日光や気温等の周囲の環境の変化による鼻部皮膚温度の変化と心的負荷がかかったことによる鼻部皮膚温度の変化の影響を切り分けることは難しい。一方、前額皮膚温度から鼻部皮膚温度の差の変化は、周囲の環境の変化にも対応することができるため、この温度差の変化に注目することとした。実船実験におけるアプローチ操船時に取得した鼻部皮膚温度データに、上記の 3 つのフィルターを用いて外れ値を取り除き、温度差の時間的変化を算出した結果を図 7.1.7 に示す。最終的に正常値として検出されたデータ数は 449 個であり、これは元データの約 24%であった。計測時間は全体で 1 分半 (90 秒) であり、データが取得できなかった合計時間は 36 秒であった。また、連続してデータを取得できなかった最大時間は 10 秒であった。

3 つのフィルターにより正しく正常値を検出できているかどうかを確認するために、正常値として検出されたデータに対応する鼻部座標データを、改めて赤外線画像にプロットして確認することとした。その結果、449 個のデータのうち 391 個、つまり約 87%の割合で正しく鼻の位置をプロットしていたことが分かった。正しく鼻の位置をプロットできていた時の赤外線画像を図 7.1.8、できていなかった時の赤外線画像を図 7.1.9、図 7.1.10 に示す。図中の赤丸プロットした鼻部座標データである。正しく鼻の位置をプロットできていなかった場合は、大きくこの 2 つのケースがあることが分かった。一つは Kinect が鼻以外の部分を鼻であると誤認識した場合である (赤外線画像例①)。このケースでは、被験者が横を向いたため、耳の穴の位置を鼻と誤認識したと考えられる。もう一つのケースは、単純に算出された座標がずれている場合である (赤外線画像例②)。この誤認識は、被験者の顔の動きが激しい場合によく見られたため、赤外線画像と Kinect の細かな時間のずれによって生じていることが考えられる。

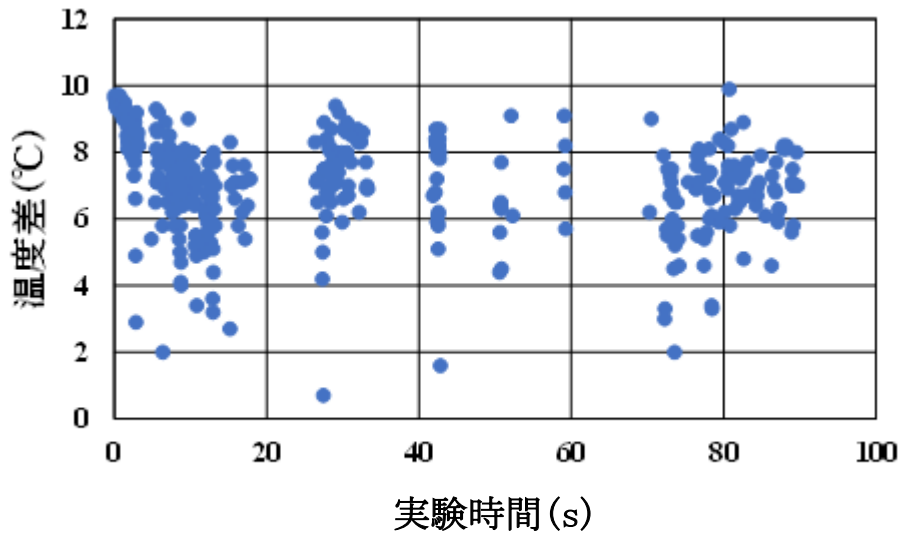


図 7.1.7 3つのフィルターを通した後の温度差の時間的変化

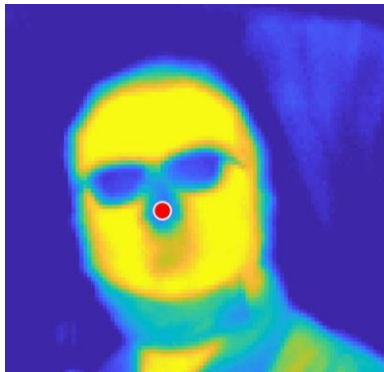


図 7.1.8 正しく鼻の位置を
プロットできた赤外線画像
例

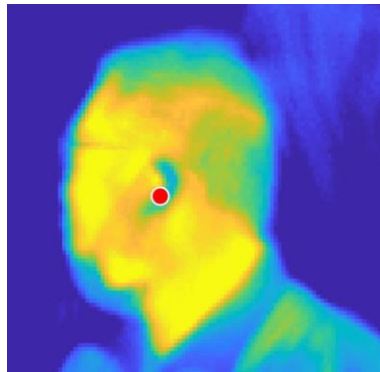


図 7.1.9 正しく鼻の位置を
プロットできなかった
赤外線画像例①

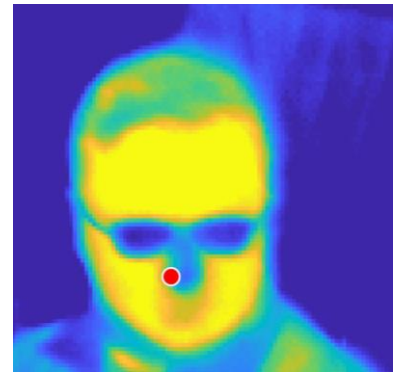


図 7.1.10 正しく鼻の位置
をプロットできなかった
赤外線画像例②

温度差には個人差があると考えられるため、実験時の被験者の温度差から心的負荷がかかっているかどうかを判断するために、安静時の温度差と比較することとした。第 6 章でも述べた通り、安静時のデータは二回の入港実験が終了した後に取得したもので、実験時と同じく船橋内において、約 2 分間の安静状態から得たデータである。この安静時の温度差の平均は 6.17°C であった。したがって本研究では、 6.17°C を基準として実験時の被験者の温度差と比較することとした。図 7.1.7 のグラフに、安静時の 6.17°C の基準線を加えたグラフを図 7.1.11 に示す。赤色の直線が 6.17°C の基準線であり、黒色の線は正常値のデータの区間数 10 の移動平均である。実験時間 20 秒から 70 秒までの区間はデータ数のバラツキが大きいため実験時間 20 秒までの区間①と実験時間 70 秒から 90 秒までの区間②に分けて分析することとした。区間①は一回目の実験終了後、出港した後に二回目の実験を開始するために回頭している最中から前進を開始し数秒経過するまでであり、区間②は防波堤手前を前進中から防波堤を横切るまででの区間である。区間①の温度変化のグラフを図 7.1.12、区間②の温度変化のグラフを図 7.1.13 に示す。図 7.1.11 を見ると、温度差データの移動平均は全体的

に基準値よりも大きい値は示している。また、温度差データは図 7.1.12 では実験時間が経過するにつれて下降する傾向が見られ、一方図 7.1.13 では上昇の傾向が見られる。

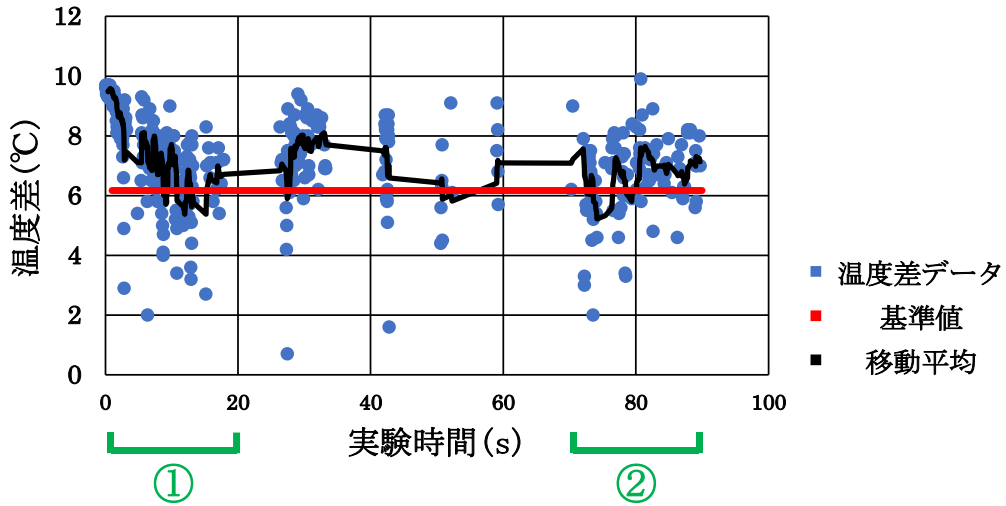


図 7.1.11 基準線を加えた温度差の変化

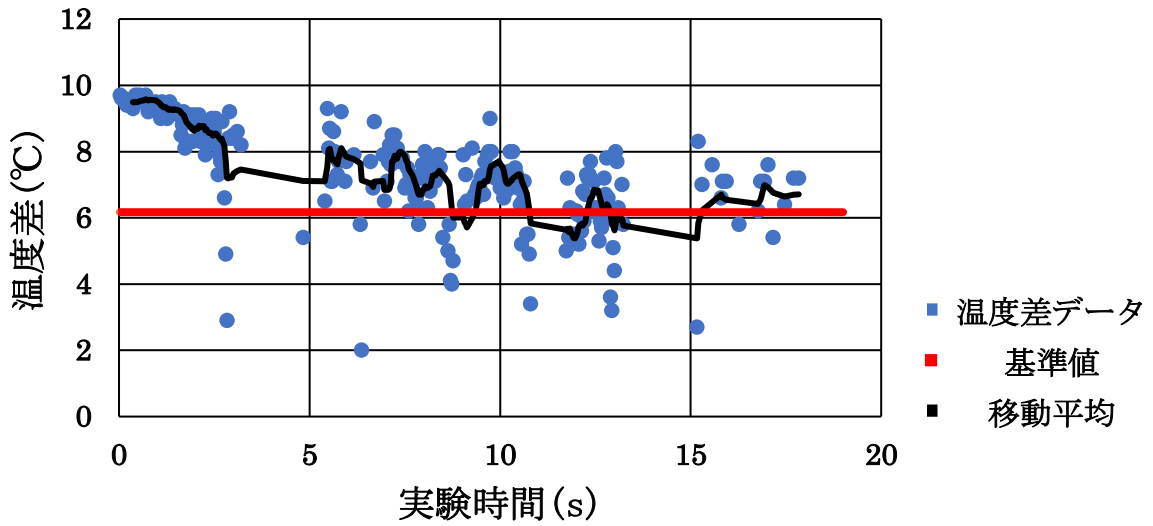


図 7.1.12 区間①の温度差の変化

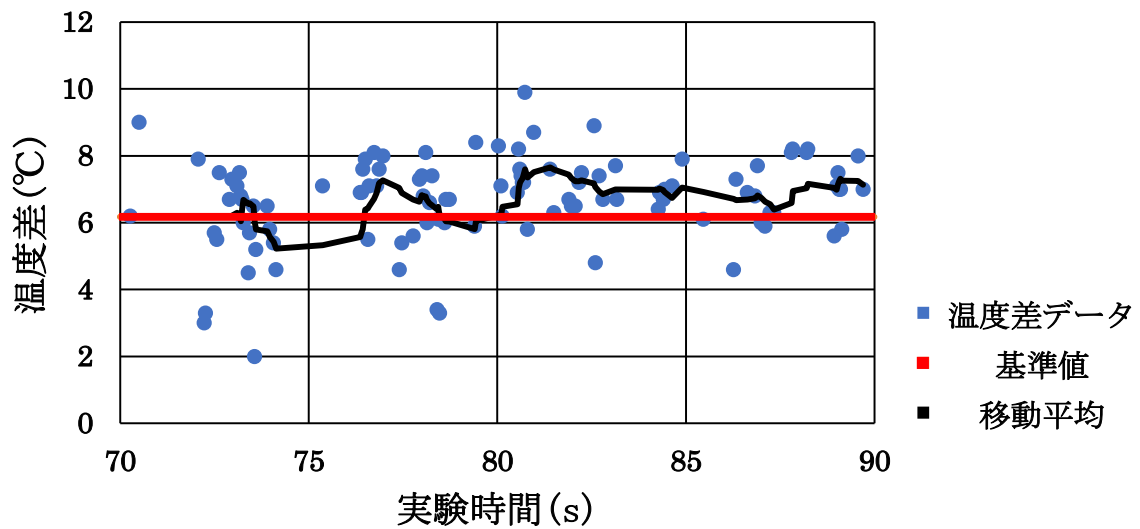


図 7.1.13 区間②の温度差の変化

7.2 統計検定用いた実験結果の検定

実験時間 0 秒から 90 秒までの計測時間全体と、区間①（0 秒から 20 秒、アプローチ操船の初期段階）及び区間②（70 秒から 90 秒、アプローチ操船の最終段階）において、それぞれ安静時と操船時の前額部皮膚温度から鼻部皮膚温度を引いた値（以下、温度差）に有意な差があるかどうか、また区間①と区間②の操船時の温度差の間に有意な差があるかどうかを確かめるために、統計検定を行った。

(1) 統計検定の概要[63]

統計検定とは、2 つ以上のデータ群に対し、このデータ群の間には差がないという仮定（帰無仮説）のもと検証をし、この仮説を否定（棄却）できるかどうかで、データ群に差が認められるかどうかを判定する手法である。この統計検定は工業製品の品質管理や新薬の効果の判定、アンケート分析など多くの場面で利用されている。多くの場面に適用できるように、統計検定手法の種類も多く存在する。

統計検定の手法は表 7.2.1 に示すように分類される。まずは比較するデータ群の数で分類される。3 群以上の場合はデータ群間の対応の有無に関わらず分散分析をすることとなる。データ群が 2 群の場合は、データ群間に対応がある場合は「対応のある t 検定」を行い、データ群間に対応がない場合は更に細かく手法が分類されている。対応の有無とは比較するデータ群に対し、比較するデータ以外の要素も異なっているか否かである。例えば本実験で得られた鼻部皮膚温度と前額部皮膚温度を比較する際は、比較する二つのデータ以外の要素（測定時刻、自船や海域の状況等）がすべて一致しているため対応のある 2 群であると判断できる。今回は安静時と操船時の膚温度差、または区間①と区間②の温度差を比較するため、データ群は 2 群である。また、比較するデータは全て測定時刻の異なる温度差のデータであり、温度を取得した際の海域の状況など比較するデータ以外の要素も異なっているため対応のないデータ群であると判断できる。

また、今回のような 2 群のデータは、正規性の有無と等分散性の有無により表 7.2.2 に示す通りに使用する検定方法を決めることができる。正規性の有無はカイ二乗適合度検定、等分散性の有無については F 検定を用いて判断することができる。今回使用した検定手法は Student's t 検定、Welch's t 検定、Brunner-Munzel 検定の 3 種類であった。

表 7.2.1 検定方法の決定方法①

2 群	対応なし	表 7.2.2 参照
	対応あり	対応のある t 検定（一対の標本による平均の検定）
3 群以上	対応関係なし	一元配置分散分析 二元配置分散分析 多元配置分散分析

表 7.2.2 検定方法の決定方法②

手法	正規性	等分散性
Student's t	○	○
Welch's t	○	×
Mann-Whitney	×	○
Brunner-Munzel	×	×

(2) 検定手法の手順

① カイ二乗適合度検定[64]

帰無仮説：データは正規分布ではない

I. データの標準化

データ群内で以下の式を使用して値を標準化する。

$$\text{標準化した値} = (\text{データの値} - \text{平均値}) \div \text{標準偏差}$$

II. 分布を4つの領域に分けて期待度数を求める

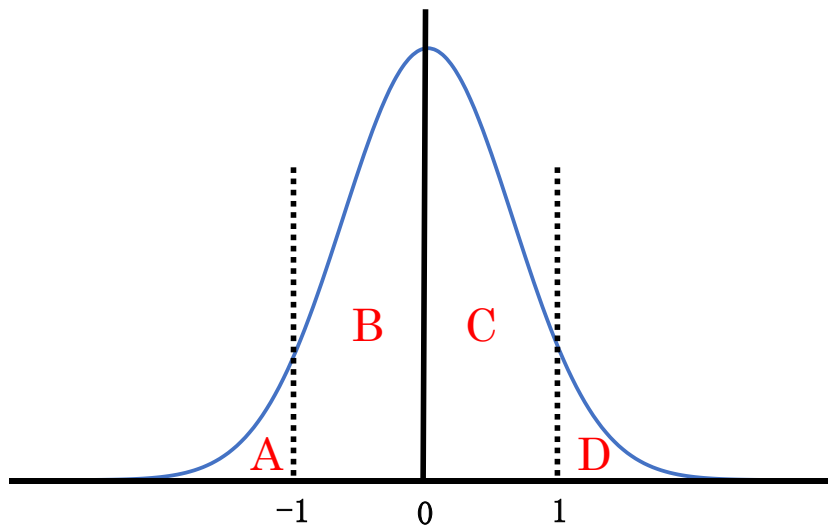


図 7.2.1 理想的な正規分布のグラフ

図 7.2.1 のように A : -1 未満、B : -1 以上 0 未満、C : 0 以上 1 未満、D : 1 以上の4つの領域に分ける。理想的な正規分布の場合、A と D に入る割合は 15.9%、B と C に入る割合は 34.1%となる。期待度数はこれらの値に各データ群のデータ数を掛け合わせることで求めることができる。

III. 観測度数を求める

II で定めた 4 つの領域内に含まれるデータ数を調べ、そのデータ数を観測度数とする。

IV. 期待度数と観測度数のずれをカイ二乗値で調べる

それぞれの領域におけるカイ二乗値を以下の式で求める

$$\text{カイ二乗値} = \{(\text{観測度数} - \text{期待度数})^2 \div \text{期待度数}\}$$

V. カイ二乗値の合計値を求めてカイ二乗分布表の値と比較する

A、B、C、D のカイ二乗値を合計した値と、自由度と有意水準の値を使用し求めたカイ二乗分布表の値と比較する。自由度は 1 であり、有意水準は検定をする際に個人で定める値であるが、一般に 5%、つまり 0.05 である。自由度 1、有意水準 5% の際のカイ二乗分布表の値は 3.84 である。

カイ二乗値の合計値とカイ二乗分布表の値を比較して、カイ二乗値の合計値の方が小さければ検定しているデータ群についての帰無仮説が棄却され、データの分布は正規分布であると言える。

② F 検定[63][64]

帰無仮説：二つのデータ群の分散は等しい

I. 分散比を求める

それぞれのデータ群内で分散を求め、分散の大きい方の値を分散の小さい方の値で割ることで分散比を得る。

II. それぞれの自由度を求める

I で分散の値が大きかったデータ群の自由度を”分子の自由度”、分散の値が小さかったデータ群の自由度を”分母の自由度”としてそれぞれの自由度を求める。自由度はそれぞれのデータ群のデータ数から 1 を引いた値となる。

III. F 値を得る

F 分布表を参照し、II で求めた二つの自由度から F 値を得る。

IV. 分散比と F 値を比較する

分散比と F 値を比較し、分散比の値の方が大きければ帰無仮説は棄却され、二つのデータ群は等分散であると言える。

③ Student's t 検定[65]

帰無仮説：二つのデータ群間に平均値の差がない

二つのデータ群をそれぞれ以下のようなデータだとする。

データ X $X_1, X_2, X_3 \cdots X_n$

データ Y $Y_1, Y_2, Y_3 \cdots Y_m$

統計量 T を以下の式により求める。ここで μ_x 及び μ_y はそれぞれのデータ X、データ Y の母平均である。

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m}\right)U_{XY}^2}}$$

ここで、 U_{XY} は以下の式で与えられる値である。また U_X 、 U_Y はそれぞれのデータ群の不偏分散である。

$$U_{XY} = \frac{(n-1)U_X^2 + (m-1)U_Y^2}{n+m-2}$$

以上で与えられる統計量 T は自由度 $n+m-2$ の t 分布に従う値である。ここで、検定の帰無仮説を立てる。帰無仮説は二つの群間に平均値の差がないことであるため、すなわち $\mu_x - \mu_y = 0$ であることなので、 $\mu_x - \mu_y = 0$ を統計量 T の式に代入することで以下の T を得ることができる。

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m}\right)U_{XY}^2}}$$

この統計量 T が、自由度 $n+m-2$ の t 分布上であらかじめ設定した棄却域に入るかを考え、帰無仮説が棄却された場合、二つのデータ群間の平均値には差があると言える。

④ Welch's t 検定[66]

帰無仮説：二つのデータ群間に平均値の差がない

Student's t 検定と同じく二つのデータ群をそれぞれ以下のようなデータだとする。

データ X $X_1, X_2, X_3 \cdots X_n$
 データ Y $Y_1, Y_2, Y_3 \cdots Y_m$

統計量 T を以下の式により求める。ここで μ_x 及び μ_y はそれぞれのデータ X、データ Y の母平均である。

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)}{\sqrt{\frac{U_X^2}{n} + \frac{U_Y^2}{m}}}$$

ここで、 U_X 、 U_Y はそれぞれのデータ群の不偏分散であり、以下の式で与えられる。

$$U_X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

$$U_Y^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{m-1}$$

以上で求められる統計量 T は近似的に自由度 l の t 分布に従うことが知られており、これをウェルチの近似法という。自由度 l は以下のように計算される。計算結果が整数とならない場合はその値に最も近い整数が l となる。

$$l = \frac{\left(\frac{U_X^2}{n} + \frac{U_Y^2}{m}\right)^2}{\frac{U_X^4}{n^2(n-1)} + \frac{U_Y^4}{m^2(m-1)}}$$

以上で求めた統計量 T が自由度 l の t 分布上において、あらかじめ設定した棄却域に入るかを考え、帰無仮説が棄却された場合、二つのデータ群間の平均値には差があると言える。

⑤ Brunner-Munzel 検定[67]

帰無仮説：両群から一つずつ値を取り出したとき、どちらが大きい確率も等しい

これもまた、二つのデータ群をそれぞれ以下のようなデータだとする。

データ X $X_1, X_2, X_3 \cdots X_n$

データ Y $Y_1, Y_2, Y_3 \cdots Y_m$

データ X、データ Y それぞれのデータを全て並べた $N=n+m$ 個のデータ

$X_1, X_2, X_3 \cdots X_n, Y_1, Y_2, Y_3 \cdots Y_m$

の全体を通しての順位を

$R_{X1}, R_{X2}, R_{X3} \cdots R_{Xn}, R_{Y1}, R_{Y2}, R_{Y3} \cdots R_{Ym}$

であるとする（同順位のデータがある場合は順位の平均を用いる）。この各群内での平均を

$$\bar{R}_X = \frac{1}{n}(R_{X1} + R_{X2} + \cdots + R_{Xn})$$

$$\bar{R}_Y = \frac{1}{m}(R_{Y1} + R_{Y2} + \cdots + R_{Ym})$$

とする。また、それぞれの群内での順位を

$R_1^{(X)}, R_2^{(X)}, R_3^{(X)} \cdots R_n^{(X)} \quad R_1^{(Y)}, R_2^{(Y)}, R_3^{(Y)} \cdots R_m^{(Y)}$

とする。ここでそれぞれの標本分散 S^2 及び母分散 σ^2 は次のように表される。

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (R_{Xk} - R_k^{(X)} - \bar{R}_X + \frac{n+1}{2})^2$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (R_{Yk} - R_k^{(Y)} - \bar{R}_Y + \frac{m+1}{2})^2$$

$$\sigma_X^2 = \frac{S_X^2}{(N-n)^2}, \quad \sigma_Y^2 = \frac{S_Y^2}{(N-m)^2}, \quad \sigma_N^2 = N \left(\frac{\sigma_X^2}{n} + \frac{\sigma_Y^2}{m} \right)$$

従って統計量 T は

$$T = \frac{1}{\sqrt{N}} \times \frac{\bar{R}_Y - \bar{R}_X}{\sigma_N} = \frac{nm(\bar{R}_Y - \bar{R}_X)}{(n+m)\sqrt{nS_X^2 + mS_Y^2}}$$

で計算することができる。これは漸近的に n や m が大きくなるほど、標準正規分布 $N(0, 1)$ に近づく。また自由度 f は以下の式で求めることができる。

$$f = \frac{(\frac{\sigma_X^2}{n} + \frac{\sigma_Y^2}{m})^2}{\frac{(\sigma_X^2/n)^2}{n-1} + \frac{(\sigma_Y^2/m)^2}{m-1}} = \frac{(nS_X^2 + mS_Y^2)^2}{\frac{(nS_X^2)^2}{n-1} + \frac{(mS_Y^2)^2}{m-1}}$$

以上で求めた統計量 T が自由度 f の t 分布上においてあらかじめ設定した棄却域に入るかを考え、帰無仮説が棄却されたら両群から 1 つずつ値を取り出したとき、どちらが大きい確率も等しいとは言えない、つまりどちらが大きい確率は等しくないと言える。この検定方法はデータの並べ替えが必要であり、また複雑な計算を要するため、実際に使用する際は統計解析ソフトウェアである R などを使うことが多く、本研究でも統計解析ソフトウェア R を使用した。

(3) 実験結果の統計検定結果

① 実験時間 0 秒から 90 秒までの区間

この区間はカイ二乗適合度検定により、安静時と実験時の前額部皮膚温度から鼻部皮膚温度を引いた値（以下、温度差）には、有意水準 5% で正規性があり、 F 検定により二つのデータ群間では有意水準 5% で等分散ではないという結果が得られた。そのため、この区間での安静時と実験時の温度差の比較は、表 7.2.2 に示した「Welch's t 検定」を使用した。検定の結果、有意水準 5% で安静時と実験時の温度差に有意な差が認められた。また、温度差の平均値は実験時が 7.20°C 、安静時が 6.17°C であった。

② 区間①（実験時間 0 秒から 20 秒までの区間）

この区間はカイ二乗適合度検定により、安静時と実験時の温度差には、有意水準 5% で正規性があり、 F 検定により二つのデータ群間では有意水準 5% で等分散ではないという結果が得られた。そのため、この区間での安静時と実験時の温度差の比較には「Welch's t 検定」を使用した。検定の結果、有意水準 5% で安静時と実験時の鼻部皮膚温度に有意な差が認められた。また温度差の平均値は実験時が 7.45°C 、安静時が 6.17°C であった。

③ 区間②（実験時間 70 秒から 90 秒までの区間）

この区間はカイ二乗適合度検定により、有意水準 5% で安静時の温度差には正規性があり、実験時の温度差は正規性がないという結果が得られ、 F 検定により二つのデータ群間では有意水準 5% で等分散ではないという結果が得られた。そのため、この区間での安静時と実験時の温度差の比較には「Brunner-Munzel 検定」を使用した。検定の結果、有意水準 5% で安静時と実験時の温度差に有意な差が認められた。また温度差の平均値は実験時が 6.68°C 、安静時が 6.17°C であった。

④ 区間①と区間②の実験時の温度差

カイ二乗適合度検定により、区間①と区間②の温度差には、有意水準 5% で正規性があり、 F 検定により二つのデータ群間では有意水準 5% で等分散性があるという結果が得られた。そのため、区間①と区間②の温度差の比較は「Student's t 検定」を使用した。検定の結果、有意水準 5% で区間①と区間②の温度差の間に有意な差が認められた。また温度差の平均値は区間①が 7.45°C 、区間②が 6.68°C であった。

7.3 赤外線画像の測定間隔による実験結果の比較

(1) 一回目の実験と二回目の実験の結果の比較

赤外線画像の測定間隔問題のあった一回目の実験結果（以下、実験結果(1)）も二回目の実験結果（以下、実験結果(2)）と同様に、第 7.1 章の図 7.1.2 で説明したフィルター①、②、③にかけた。フィルターをかける前のデータ数は 1058、フィルター①、②をかけた後のデータ数は 386、フィルター③まで掛けた後のデータ数は 116 個であった。表 7.3.1 に、実験結果(1)と第 7.1 章で説明した実験結果(2)のデータ数と比較結果を示す。表 7.3.1 における割合とは、それぞれのフィルターをかける前のデータ数を基準としたデータ数の割合である。表 7.3.1 より、フィルター③をかけると実験結果(1)が実験結果(2)に比べ、極端にデータ数が減少し、データの割合が落ちていることが分かる。つまり実験結果(1)と(2)を比較した場合、フィルター①、②をかけた後のデータに大きな違いが生じていることが考えられた。そこで、フィルター①、②をかけた後のデータについて、座標合わせによって得られた鼻部座標を赤外線画像にプロットし、正確に鼻の位置を示しているかを調べた。その結果、実験結果(2)は 82%の割合で正確に鼻の位置をプロットできているのに対して、実験結果(1)は 22%となり、多くのデータが鼻部とは異なる位置にプロットされる結果となった。

実験結果(1)で作成した赤外線画像を図 7.3.1 に示す。この 3 枚の赤外線画像は実験時間 16.27 秒、16.67 秒、16.73 秒における鼻部座標データをプロットしたものである。前述しているとおり、赤外線センサーとは計測時間間隔が異なり、Kinect のデータはミリ秒単位で計測されるが、赤外線センサーの測定間隔が 1 秒のため、プロットに使用した赤外線画像は全て同じ画像となっている。図 7.3.1 は、被験者が顔を右に向けるタイミングに撮られたものである。図 7.3.1 のプロットした点から、鼻の座標が被験者から見て右側に移動していることが分かる。作成した赤外線画像で鼻の位置を正確に取得できていない場合は、このように Kinect データを取得した時間と赤外線画像の取得時間の細かいずれがほとんどであった。本実験の被験者は眼鏡のフレームや顔の輪郭であれば 25℃以上 30.6℃以下の値であるため、図 7.3.1 の様に鼻とずれた位置を Kinect で計測してしまった場合でも、フィルター①、②で外れ値と認識することができなかつたと分かる。しかし、眼鏡のフレームや顔の輪郭など、赤外線画像上の実際の鼻の位置だと思われる場所から大きく離れた位置をプロットしている場合、鼻だけでなく両目の座標も使用して算出する前額部の位置は顔の輪郭からはずれ背景の部分を示してしまうことが考えられる。そのためフィルター③をかけることで、それらの外れ値が大幅に削られたと考えられる。つまり、フィルターの①から③までを段階的に使用することは、外れ値の自動判定に有効であり、鼻部皮膚温度の計測精度を向上させることが可能であると考えられる。

表 7.3.1 一回目と二回目の実験結果のデータ数の比較

フィルター	実験結果(1)		実験結果(2)	
	データ数	割合[%]	データ数	割合[%]
なし	1058	100	1900	100
①、②	386	36	550	28.9
①、②、③	116	11	449	24

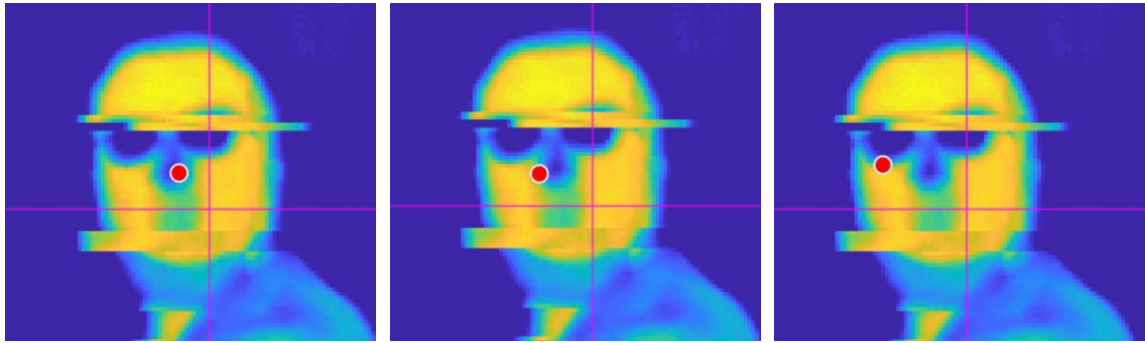


図 7.3.1 一回目の実験結果で作成した赤外線画像

(2) 赤外線センサーの測定間隔の検証

第 6 章でも説明した通り、一回目の実験では赤外線画像の測定間隔を 1 秒としていたため図 6.4.2 のような赤外線画像が多く取得されてしまった。この現象は、赤外線画像の測定間隔を短く設定することで対処することができるが、測定間隔を無意味に短くすると収集されるデータ数が莫大となり、分析には多くの時間が必要となる。そこで、鼻部皮膚温度計測における赤外線画像の適切な測定間隔を検討した。

① 赤外線センサーの測定間隔検証実験の方法

図 7.3.2 に実験における赤外線センサーと被験者の位置関係を示す。図 7.3.2 より、赤外線センサーは被験者の正面で 160cm 離れた位置に設置し、1 分間で撮影を行った。実験中、被験者は往復約 2 秒の間隔で左右に顔を振った。赤外線センサーの測定間隔は、1 秒以上は任意の間隔にすることができるが、1 秒未満の場合は 1/5 秒、1/10 秒、1/15 秒、1/30 秒の中から選択することとなる。測定間隔 1 秒で実験時に問題が見られたため、検証では 1 秒以下の測定間隔で計測し、その結果を比較することとした。

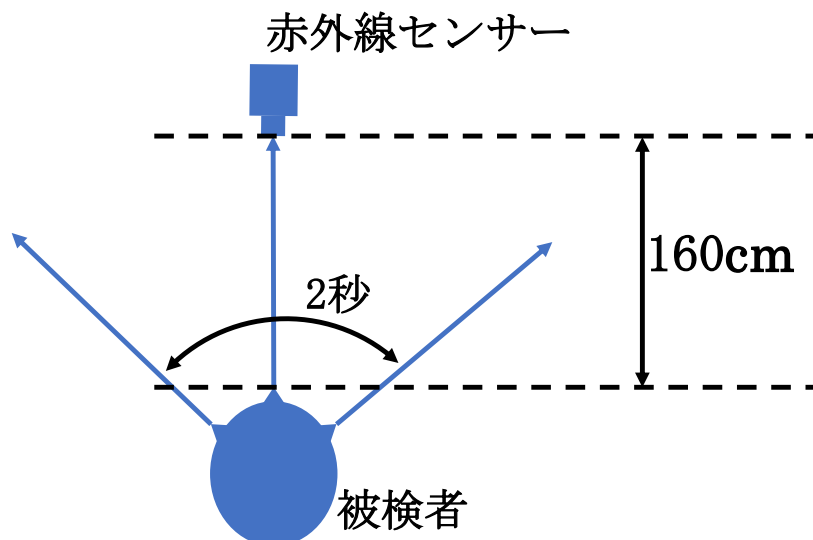


図 7.3.2 赤外線センサーの測定間隔検証実験の設定

② 赤外線センサーの測定間隔検証実験の結果

測定間隔を 1 秒と 1/5 秒に設定した場合の被験者の顔面周辺の赤外線画像の取得例を図 7.3.3 と図 7.3.4 に示す。どちらも被験者が赤外線センサーに向かって正面から左に向く場面である。図 7.3.3 に示すように、測定間隔 1 秒では被験者の顔の動きに対応できず、赤外線画像に横線が入ってしまっている。一方、図 7.3.4 に示すように、測定間隔 1/5 秒の赤外線画像に横線が入ることはほとんどなかった。表 7.3.2 にそれぞれの測定間隔において、横線が入ることなく正常に赤外線画像を取得することができた割合（以下、赤外線画像取得成功割合）を示す。測定間隔を 1 秒に設定した場合のみ、赤外線画像取得成功割合が極端に低い結果となった。また測定間隔 1 秒未満では、測定間隔を短くするほど赤外線画像成功割合は高くなっているが、いずれの測定間隔に設定しても、センサーの起動から最初の数秒間には横線が入るケースが見られたため、赤外線画像取得成功割合が 100%にはなることはなかった。

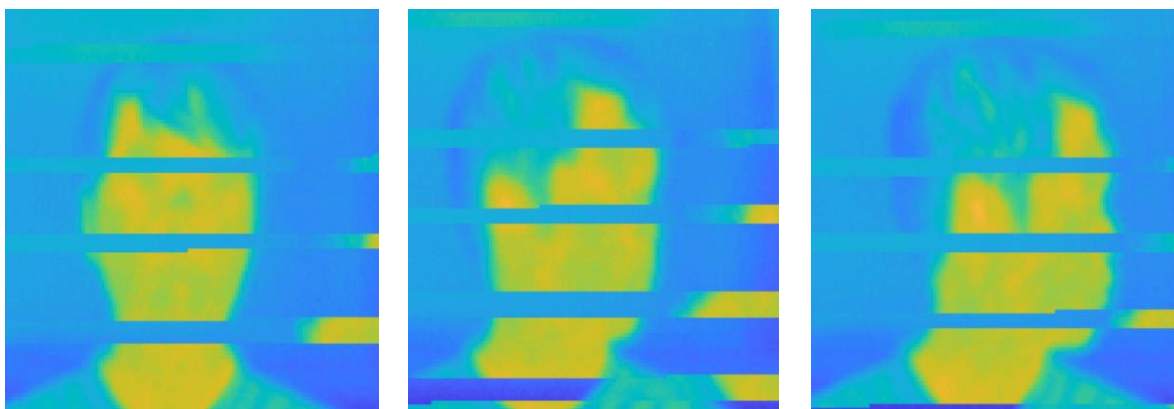


図 7.3.3 測定間隔 1 秒の赤外線画像取得例

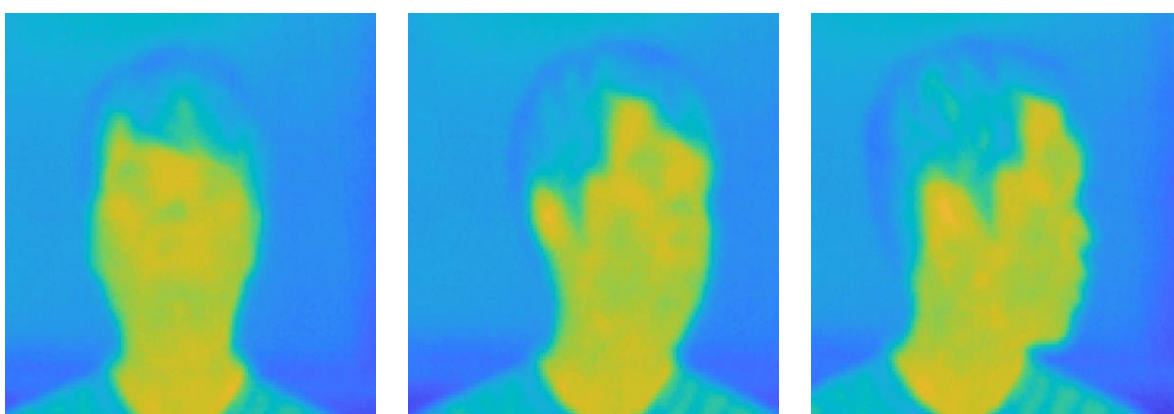


図 7.3.4 測定間隔 1/5 秒の赤外線画像取得例

表 7.3.2 測定間隔による赤外線画像取得成功割合

測定間隔[sec.]	成功割合[%]
1	15.6
1/5	90.7
1/10	94.5
1/15	97.3
1/30	99.4

③ Kinect と併用して操船者の鼻部皮膚温度測定をする際の赤外線センサーの適切な測定間隔

赤外線センサーの測定間隔検証実験の結果、一般的な首振り行為に対して横線が入ることなく赤外線画像を取得するためには、測定間隔が 1/5 秒以下であれば問題がないことが分かった。しかし、本研究のように赤外線センサーを Kinect と組み合わせ、操船者を測定するには問題点が残る。

その問題点とは Kinect が取得したデータと赤外線画像の時間にずれが生じる問題である。第 4 章で述べた通り、Kinect が正常に顔認識を行えている場合、Kinect は顔の各部位の座標データを 1 秒間に 15~25 回程度データを取得している。この Kinect による顔の各部位の座標データを赤外線データと座標合わせをする際に、Kinect がミリ秒単位まで取得している時間から計算をして対応する赤外線画像を選択する必要があった。つまり、赤外線センサーの測定間隔を大きく設定すると、その分 Kinect データと赤外線画像の間に時間的ずれが大きく生じてしまうこととなる。本研究では二回目の実験は赤外線センサーの測定間隔を 1/30 秒に設定した。その結果、Kinect で得られた鼻部座標データを、対応する時刻の赤外線画像にプロットする際に、赤外線画像の時刻が 1/30 秒ずれると、鼻から少しずれた頬の位置をプロットしてしまうことが確認された。このことから Kinect が取得したデータと赤外線画像の時間が 1/30 秒でもずれてしまうと取得する鼻部皮膚温度の正常値検出割合が下がることが分かる。したがって、測定間隔を 1/30 秒よりも大きくすることは正常値検出割合を下げることになるため望ましくない。

一方、赤外線画像取得成功割合を高めるために、赤外線センサーの測定間隔を過度に小さく設定するとデータの分析に時間がかかるという問題が発生する。本研究では、赤外線画像のデータを全てエクセルデータに変換して利用している。測定間隔を 1/30 秒に設定した場合、測定間隔 1 秒に設定した場合と比較し、分析の必要なデータの数は 30 倍となる。その結果、エクセルデータに変換に要する時間は、30 倍以上かかってしまっていた。このことから、赤外線センサーの測定間隔は、赤外線センサーのシステムで 1/30 秒未満を選択することができたとしても、Kinect が顔の各部位の座標データを取得する間隔より少し狭い 1/30 秒ほどを選択するのが最も良いと考えられる。

第 8 章 考察

8.1 鼻部皮膚温度の変化と心的負荷に関する考察

第 3 章で述べた通り、人間は心的負荷がかかると前額部皮膚温度はあまり変化しないが鼻部皮膚温度が低くなることが知られている。本研究では、入港・着岸時の小型船舶の操船者の鼻部皮膚温度を計測したが、第 7 章で示した通り、アプローチ操船開始から経過時間 90 秒までの全区間における前額部皮膚温度から鼻部皮膚温度を引いた値（以下、温度差）は、安静時の温度差と比べ、平均値として約 1.03° 高く、また統計的検定により有意な差が認められたことから、安静時に比べアプローチ操船時は操船者に心的負荷がかかっていることが考えられる。同様に、区間①（アプローチ操船の初期段階）と区間②（アプローチ操船の最終段階）においても、安静時と比べて操船者の心的負荷がかかっていることを示すことができた。

研究開始当初は、アプローチ操船開始からポンドへの入港、そして着岸操船と実験時間が経つにつれて、被験者の心的負荷が大きくなる（温度差が大きくなる）と予想していた。しかし区間①と区間②を比べた場合、研究開始当初の予測に反し、二区間の温度差に有意な差が認められたものの、区間①の時間帯の方が温度差の平均値が高く、操船者に心的負荷がかかっているという結果となった。

この原因として、区間①の時間帯では、ポンド周囲の船舶の航行状況によって、操船者へ心的負荷が大きくかかったことが考えられる。一回目の実験が終了し、ポンドを出港する際の周辺の様子を図 8.1.1 に示す。赤色の三角のマークが自船、青色の三角のマークは他船である。また他船と繋がっている四角のマークはそれぞれが曳航している、もしくは押している台船等である。黒く塗りつぶしのある部分は陸地や障害物等で航行することのできない場所である。第 6 章で述べた通り、被験者は平均月 2 回ほどの頻度でやよいを操船しており、実験を行った海域での入出港作業には十分に慣れている。しかし、二回目のアプローチ操船開始直前、自船の右から左に横切る曳航船が二隻（A 船と B 船）、回頭中の押し船（C 船）が一隻あり、実験した海域ではあまり遭遇しないような船舶輻輳状態であった。また C 船は、自船が二回目の実験に向けて回頭しようとしていた場所に近い位置で非常にゆっくり回頭をしており、被験者から「あれ曲げるよね?」、「大丈夫だよな?」というような不安を感じさせる発言もあったことから、この周囲の船舶の状況が被験者へ心的負荷をかけていたと考えられる。実験後のヒアリング調査でも、被験者より「混みあっていてストレスがかかっていたと思う」という説明があった。船舶が輻輳する中、入港のために回頭している際に二回目の実験を開始したため、図 7.1.11 に示すように、区間①では温度差の値が大きくなったと考えられる。

一方、防波堤を通過するまでの区間②では、「ここら辺はいつも通りだから」という被験者の発言があり、防波堤通過後に「二回目行きます」と発言していたことから、被験者にとっては防波堤を通過するまでは、操船をしていない安静時よりは緊張するものの、十分に慣れた操船であり、心的負荷は大きくはかかっていたいなかったものと考えられる。

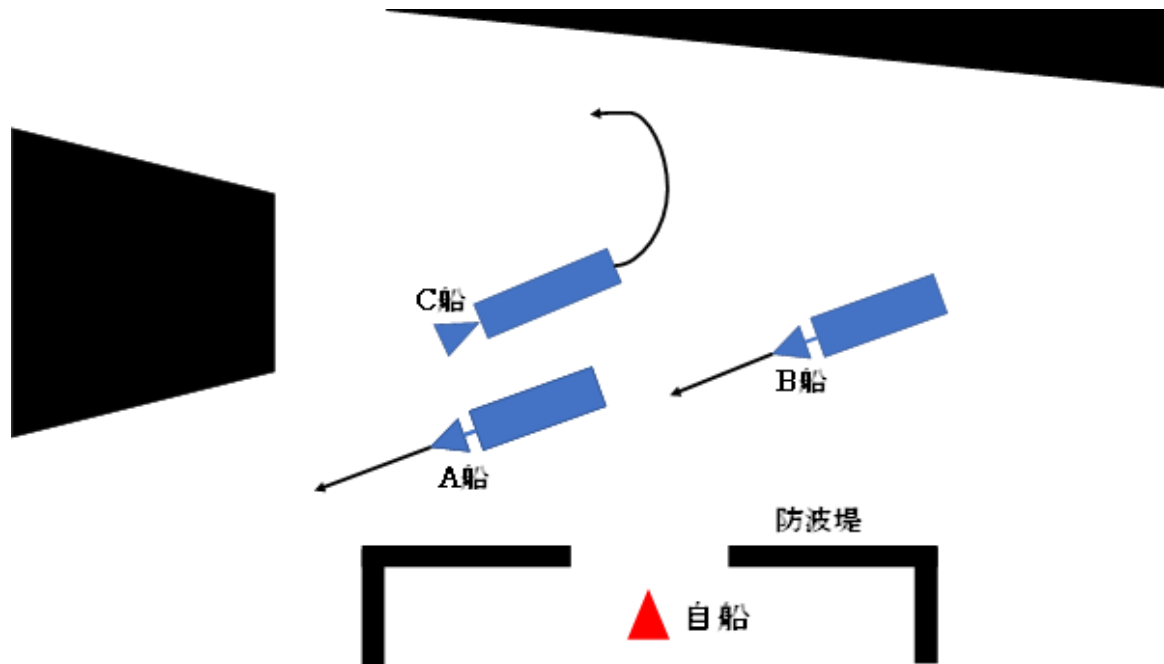


図 8.1.1 二回目の実験前の周辺の船舶の様子

8.2 鼻部皮膚温度の自動計測の実船での利用に関する考察

表 7.2.1 で示した通り、今回の実験で得られたデータ数は 3 つのフィルターをかけることによって、元のデータ数の約 24%にまで減ってしまっている。また、連続してデータを取得することができなかった時間は最大で 10 秒間あった。データの減少や連続性が、各場面において操船者の心的負荷変化の計測に、どのような影響を与える可能性があるかについて考察した。

(1) 着棧時

まず、着棧操船時にほとんどデータを取得することができなかったことに関しては、システムの改善が必要であると考えられる。着棧時は操船者に最も心的負荷がかかると考えることができる場面の一つであり、周囲の状況も刻々と変化するため、連続して 1 秒毎に鼻部皮膚温度データを取得できていることが理想である。本研究の着棧操船において鼻部皮膚温度データの大半を取得できなかった理由は、やよいが防波堤を通過した後、右舷側にある着棧場所に入船右舷付けで着棧しなければならなかったにも関わらず、Kinect 及び赤外線センサーの設置場所が被験者から見て左前方であったことが考えられる。しかし、今回の実験で使用したやよいは小型船で船橋内は非常に狭く、また Kinect の計測性能を考慮しても、今回設置した場所が最善の設置場所であった。このことから、やよいのような非常に狭い船橋を持つ小型船舶では、新たに Kinect 及び赤外線センサーの設置場所を確保しない限り、鼻部皮膚温度データの連続取得は難しいと考えられる。しかし、一般的な商船は船橋が広く、Kinect 及び赤外線センサーの設置場所の選択肢も多く、検討の余地がある。つまり、小型船舶よりも計測精度の良い場所に各センサーを設置し、鼻部皮膚温度のデータを自動取得できる可能性が高い。ただし、一般商船においても着棧操船時には、岸壁との距離を確認する等、普段の航行時とは異なる動きをするため、航行時と着棧時で Kinect 及び赤外線センサーの設置場所を変更する等の工夫が必要と考えられる。

また、着棧操船時の操船者の鼻部皮膚温度を計測するための改善方法として、Kinect や赤外線センサーを船橋の外、具体的にはウイングなどに設置すること等が考えられるが、船橋の外は日光の影響を受けやすく、赤外線を利用している Kinect 及び赤外線センサーが正常に使用できるかの十分な検討が必要である。大型船などは着棧時に操船者はウイングから身を乗り出して自船と岸壁との距離を確認することがある。このような場合、ウイングに Kinect 及び赤外線センサーを設置していたとしても、鼻部皮膚温度データを取得することは難しいと考えられ、現状、本研究で提案したシステムでは操船者の心的負荷の計測は難しいと考えられる。

(2) 入港へのアプローチ操船時

入港へのアプローチ操船は、着棧操船ほど周囲の状況や操船者の作業の変化が大きくはないため、本研究の小型船舶による実船実験の結果で示したように、心的負荷データの連続性として 10 秒ほど間隔が開いたデータであっても、大きな問題はないと考えられる。しかし、リアルタイムに操船者の心的負荷を鼻部皮膚温度からモニタリングするためには、システムの改善が必要である。

入港へのアプローチ操船では、操船者は着棧する予定の場所を確認することが多いと考えられる。その際に着棧場所が、今回の実験のように設置した Kinect や外線センサーと反対舷にあると、鼻部皮膚温度データを取得できない時間が長くなってしまうことが考えられる。そのため、大型船であればセンサーを両舷に一個ずつ設置する等、船橋内を複数のセンサーでカバーすることで、連続した鼻部皮膚温度データの取得が可能になると考えられる。ただし、複数の Kinect 及び赤外線センサーにより、センサー同士の干渉の影響の有無や大きさについて検証が必要である。

(3) 通常航行時

入港アプローチ操船や着棧操船に比べ、通常航行時における操船者のタスクは少なく、行動も少ないことが予想される。そのため、小型船舶・大型船を問わず、本研究の小型船舶による実船実験の結果で示したように、心的負荷データの連続性として 10 秒ほど間隔が開いたデータであっても、大きな問題はないと考えられる。

通常航行時に操船者に心的負荷がかかるタイミングとして考えられるのは、他船を初認した時や他船と危険な見合い関係であると認識した時、また視界の悪い時などが考えられる。しかし、1 秒よりも細かい単位での心的負荷の測定は必要ないと考えられる。自動車など他の交通分野では、事故が発生する時、危険を認識してから事故が起きるまでの時間が非常に短いため心的負荷の測定も、できるだけ細かい間隔で行う必要がある。しかし、船舶の航行スピードは遅く、船舶事故の場合、他船のとの衝突の危険を認識してから、実際に衝突の事故に至るまでは数分～数十分の時間がかかる。鼻部皮膚温度データに数秒の間隔があったとしても、事故が発生するまでの操船者の心的負荷の変化を測定するには十分であると考えられる。

また、今回の実験では船橋の非常に狭いやよいを使用したため、第 6 章でも示した通り Kinect と被験者の顔の水平方向の角度が 48° であった。図 5.3.2、表 5.3.1 で示した通り、Kinect と被験者の顔の水平方向の角度が 45° 以上になると、途端に Kinect の顔認識の精度が落ちることが分かっている。また先行研究で、簡易操船シミュレータ実験において、Kinect

と被験者の顔の水平方向の角度が約 45° の位置に Kinect を設置して実験を行った結果、平均 87%の確率で正常な鼻部皮膚温度を自動計測できた[47]。このことから、通常航行時は Kinect を測定精度の高い場所に設置することで、精度の高い鼻部皮膚温度の計測だけではなく、鼻部皮膚温度データの欠損も少なく測定することが可能であると予想できる。

本研究で提案した、Kinect 及び赤外線センサーの組み合わせによる鼻部皮膚温度の自動計測システムの適用範囲について、表 8.2.1 に示す。×は本システムの適用が困難である、△は改善を要するものの本システムを適用できる可能性がある、○は本システムを適用することが可能であることを示している。各センサーの設置場所の工夫や複数センサーの組み合わせ等の対策により、現在は測定が難しい場面でも、操船者の心的負荷の計測システムとして活用できる可能性があると考えられる。

表 8.2.1 各場面における本システムの適用の可否

	小型船	大型船
着岸時	×	×
入港へのアプローチ時	△	○
通常航行時	○	○

8.3 今後の展望

本研究では、実船での Kinect 及び赤外線センサーの組み合わせによる、操船者の心的負荷の自動計測の可能性を示すことができた。今後、様々な船舶の船橋において操船者の心的負荷をリアルタイムで把握するシステムを開発するにあたり、考慮すべき点を下記①から⑤に示す。

① Kinect の複数台の組み合わせによる使用可否

第 8 章でも示した通り、操船場面によっては、船橋の両舷に Kinect を設置することで、操船者の鼻部皮膚温度データをさらに正確に取得することができると考えられる。また大型商船での利用を想定すると、Kinect の視野では一台のみで船橋全体をカバーすることが難しいと考えられる。そのため、実船での利用には複数台 Kinect を組み合わせで設置することが好ましいと考えられるが、この際に Kinect 同士の近赤外線が干渉し合う可能性があり、十分な検証が必要である。

② 大型船での本システムの使用

先行研究と本研究を通して、小型船に比べ大型船は船橋の前部の広さが確保されており、Kinect や赤外線センサーを適当な場所に設置できると考えられ、本システムを用いることで大型船の通常航行時は操船者の心的負荷の計測を連続的に安定して行えると予想できる。しかし、大型船の通常航行では、操船者が船橋内を歩きながら情報収集を行っており、かつ操船者が双眼鏡を覗くといった小型船舶にはない行動が含まれる。そのため、船橋内の移動や双眼鏡使用など、操船者の行動が変化した場合にも、Kinect の顔認識が継続して機能するかを調べる必要がある。また大型船は基本的に 2 名当直であり、船橋には操船者の他に操舵手が居ることが一般的である。Kinect のカタログ性能では、最大 6 人まで同時に識別が可能であるとされているが、今回作成した鼻部位置取得プロ

グラムでは 1 人の顔認識情報しか取得することができないため、今後プログラムの改良が必要である。

③ 心的負荷変動結果の精度検証

本研究では実船実験において、操船者の行動分析の結果と比較することで、前額部皮膚温度と鼻部皮膚温度の温度差から心的負荷の変化を予想することができた。しかし、前額部皮膚温度と鼻部皮膚温度の差から算出された心的負荷変動が、実際に操船に与える影響が大きいのか小さいのかまでは示すことができなかった。そのため今後の研究では心拍など、一般的に用いられている心的負荷の測定方法も併用して実験を行い、複数の心的負荷変動データの比較と操船結果による検証が必要と考えられる。

④ 顔の傾き情報の利用

表 4.1.5 に示したように、Kinect で顔認識した際に得られるデータの中に 4 種類の FaceRotation というデータが含まれている。この 4 種類の FaceRotation データは四元数という無次元数で記録されている「顔の傾き情報」である。この値を以下の式を用いて計算することで顔の傾き (Yaw、Pitch、Roll) を角度 (deg.) の値として得ることができる。式中の $q_1 \sim q_4$ は Kinect で得られる FaceRotation0~3、 ψ は Yaw、 θ は Pitch、 ϕ は Roll に対応している。顔の傾き情報を用いることで、顔の位置をより正確に求めること、鼻部皮膚温度データの信頼性の確認などに利用できると考えられる[68]。

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(q_1q_2 + q_3q_4)}{q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2} \right\} \\ \theta = \sin^{-1} \{ 2(q_2q_4 - q_1q_3) \} \\ \phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(q_2q_3 + q_1q_4)}{-q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2} \right\} \end{array} \right.$$

$$q_1 \sim q_4 : \text{FaceRotation}0 \sim 3 \\ \psi : \text{Yaw} \quad \theta : \text{Pitch} \quad \phi : \text{Roll}$$

⑤ リアルタイムでの鼻部皮膚温度計測

本研究では赤外線センサーと Kinect を併用することで実験後に操船者の鼻部皮膚温度データを取得することができた。本システムをより実用性のあるシステムにするためには、実験時にリアルタイムで操船者の鼻部皮膚温度を計測する必要がある。本研究では赤外線センサー付属の NS9200 レポート作成プログラムというソフトを使用したため、赤外線センサーで取得した温度データを、計測後に csv データに変換する必要があり、リアルタイムでの鼻部皮膚温度の計測が難しかった。

しかし、NEC Avio から提供される TS91-760 という SDK を使用することで、リアルタイムでの鼻部皮膚温度取得が可能になる可能性がある。この SDK には、赤外線カメラ制御、温度データ読み込み、熱画像表示、温度データファイルの入出力等の機能が含まれている。温度データのファイル出力に関しては、赤外線カメラの設置条件、熱画像データ、温度校正データを SIT、SIX 形式もしくは SVT、SVX 形式で出力することができる。

したがって、赤外線センサーから温度データを出力、Kinect で鼻部座標データを取得、鼻部座標データと温度データから鼻部皮膚温度データを取得するという 3 つのプログラムを 1 台のパソコンで動かすことができれば、将来的にリアルタイムでの操船者の鼻部皮膚温度の計測が十分に可能であると考えられる。

第9章 おわりに

本研究では、Kinect 及び赤外線センサーを使用して操船者の鼻部皮膚温度を自動で取得するシステムを構築し、実船において自動取得した鼻部皮膚温度から操船者の心的負荷を予想することができるか検証した。

実船実験の結果、着岸時には操船者の顔の動きが早く、連続的な鼻部皮膚温度データを取得することが難しいことが分かった。しかし入港へのアプローチ操船では、最長で 10 秒間の鼻部皮膚温度データ間隔が発生したものの、90 秒間の内 54 秒間の鼻部皮膚温度データを自動で取得することができた。また、アプローチ操船における前額部皮膚温度と鼻部皮膚温度の温度差について検証した結果、アプローチ操船中と安静時の間、及びアプローチ操船開始時と防波堤通過時の間で、それぞれ温度差データに有意な差が認められた。つまり、本システムにより小型船舶のアプローチ操船において、操船者の鼻部皮膚温度を自動的に計測し、心的負荷の予想も可能であることが示された。

先行研究で実施した室内における簡易操船シミュレータ実験の結果と合わせて検証した結果、本システムを用いることで通常航行時はより詳細かつ正確に鼻部皮膚温度データを自動取得し、操船者の心的負荷を予測できると考えられる。海難の多くは入港・着岸時ではなく通常航行時に発生している。船舶の通常航行時に Kinect と赤外線センサーを組み合わせた本システムを導入することで、非接触に操船者の心的負荷をモニタリングできる可能性が高く、船舶運航の安全に寄与できる技術であると考えられる。

参考文献

- [1] 国土交通省海事局 平成 23 年版 海事レポート 第Ⅱ部 第 3 章 船員分野
URL: [report_H23_13.pdf \(mlit.go.jp\)](https://www.mlit.go.jp/report/H23_13.pdf)
- [2] 国土交通省海事局 数字で見る海事 2021 本編 第 3 章 船員分野
URL: <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001416273.pdf>
- [3] 日本内航海運組合総連合会 船員対策
URL: www.naiko-kaiun.or.jp/union/union09.php
- [4] 無人で航行する自律航行船：ロボット貨物船「MUNIN」
URL: <https://wired.jp/2014/09/25/armchair-merchant-sailors-your-drone-ship-may-pull-in-soon/>
- [5] 日本財団 世界初、無人運航船の実証実験を開始
URL: <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2020/20200612-45056.html>
- [6] 海上保安庁、海上保安統計年報 第 69 巻 凡例
URL: <https://www.kaiho.mlit.go.jp/doc/tokei/h30tokei.pdf>
- [7] 戸羽政博、村井康二、生理指標を用いたシミュレータ教育訓練時におけるトレーナーとトレーニーの心的負荷評価に関する研究、日本航海学会誌 NAVIGATION 211(0)、35-36、2020
- [8] 井上一規、岡崎忠胤、村井康二、林祐司、操船シミュレータ訓練時の状況認識計測についての基礎研究、日本航海学会論文集 126(0)、11-18、2012
- [9] 国土交通省、外航海運の現状と課題
URL: <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001348307.pdf>
- [10] 海上保安庁、海上保安統計年報 第 69 巻 凡例
URL: <https://www.kaiho.mlit.go.jp/doc/tokei/h30tokei.pdf>
- [11] 国土交通省関東地方整備局 東京湾口航路事務所、数字で見る東京湾
URL: <https://www.pa.ktr.mlit.go.jp/wankou/data/index.htm>
- [12] 国土交通省、統計情報、海運・船舶・船員関係情報・データ、No.30 内航船舶の推移
URL: <https://www.mlit.go.jp/common/001267612.pdf>
- [13] 国土交通省、統計情報、海運・船舶・船員関係情報・データ、No.176 我が国の船員数の推移
URL: <https://www.mlit.go.jp/common/001017532.pdf>
- [14] 国土交通省、海事局、船員政策課、船員の現状等
URL: https://www.soumu.go.jp/main_content/000727908.pdf
- [15] 国土交通省、東北運輸局、海事振興部、船員労政課、東北管内内航船事業者の船員に関するアンケート調査結果について
URL: <https://www.tb.mlit.go.jp/tohoku/puresu/puresu/kj170512.pdf>
- [16] 松尾俊彦、小型内航船の課題と内航海運業界の構造問題、海事交通研究 65、23-32、2016
- [17] 国土交通省、海事局、自動運行船に関する現状等
URL: <https://www.mlit.go.jp/common/001215815.pdf>
- [18] Lars R. Hole, Ilker Fer, David Peddie, Directional wave measurements using an autonomous vessel, Ocean Dynamics, 66, 1087-1098, 2016

- [19] 三好晋太郎、村田航、三井 E&S 造船における自律化船への取り組み：自律化船に向けた操船制御装置の開発、日本マリンエンジニアリング学会誌、54(2)、220-224、2019-03
- [20] LNEWS、商船三井等/実岸壁で大型カーフェリーの自動離着棧に成功、2021年05月21日
URL: <https://www.lnews.jp/2021/05/n0521405.html>
- [21] 菊池保乃加、福岡宏一、横谷哲也、斎藤正史、寺島美昭、自動運転を対象とするアドホックネットワーク動作推定方式の検討、第82回全国大会講演論文集、2020(1)、319-320、2020-02-20
- [22] 篠田岳思、犬塚秀世、Putu Hangga、日吉一洋、自動化コンテナターミナルにおける配置計画の機能性評価 - 岸壁平行蔵置方式と岸壁垂直蔵置方式の昨日比較 - 、日本航海学会論文集、141(0)、47-59、2019
- [23] Gary B. Reid、Thomas E Nygren、The Subjective Workload Assessment Technique:A Scaling Procedure for Measuring Mental Workload、Human Mental Workload、Vol(52)、185-218、1988
- [24] Potter Scott. S 、 Bressler Jeine. R 、 Subjective Workload Assessment Technique(SWAT) : A User's Guid、Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory Technical Report、1989
- [25] Sandra G. Hart、Lowell E. Staveland、Development of NASA-TLX(Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research、Human Mental Workload、Volume52、139-183、1988
- [26] 篠田晴男、國分光輝、芳賀繁、二十課題法に依るメンタルワークロード要因の心理生理的評価、人間工学、34(1)、37-44、1998-02-15
- [27] 平柳要、岩崎賢一、神田省吾、谷島一嘉、メンタルワークロード (MWL) の測定・評価に関する実験的検討、人間工学、vol.32、No.5('96)
- [28] 萩原亨、徳永ロベルト、メンタルワークロード評価法に基づく運転中の携帯電話利用の影響に関する研究、国際交通安全学会誌、vol.30、No.3、(2005)
- [29] 茅原崇徳、坂本二郎、異常検知を応用した自動車運転時のメンタルワークロード推定と時系列変化の評価、人間工学 57(Supplement)、2C4-1-2C4-1、2021
- [30] 芳賀繁、鈴木郁、杉崎昭生、安田克、廣野康平、金城智仁、混雑海域における操船のメンタルワークロード測定、人間工学 32(Supplement)、118-119、1996
- [31] 三宅晋司、特集③人間工学のための計測手法 第3部：心理計測と解析 (6) メンタルワークロードの計測と解析—NASA-TLX 再考—、人間工学、Vol.151、No.6、('15)
- [32] 松本崇裕、後藤充裕、石井亮、渡部智樹、山田智広、今井倫太、複数ロボットとの位置関係がユーザの対話負荷に与える影響、情報処理学会論文誌、Vol.60、No.2、340-353、(Feb. 2019)
- [33] 高関怜、操船者のレジリエンスを考慮した操船シミュレータ訓練の基礎研究、東京海洋大学修士学位論文、2018
- [34] Murai Koji、Hayashi Yuji、Nagata Noriko、Inokuchi Seiji、The Mental Workload of a ship's Navigator using Heart Rate Variability、Interactive Technology and Smart Education、Vol.No2、2004
- [35] 村井康二、林祐司、三好雄一、井口征士、実船操船とシミュレータ操船における操船者の

- 目視領域と緊張度に関する基礎研究、電気学会論文誌.C,電子・情報・システム部門誌、123(7)、1311-1318、2003-07-01
- [36] GOODBRAIN ホームページ、脳波計デバイス muse2 (2021年6月14日参照)
URL:<https://goodbrain.jp/muse/>
- [37] FUTEC ホームページ、FAQ、脳波測定とは (2021年6月14日参照)
URL:<https://www.futek.co.jp/faq/aboutbrainwave.html>
- [38] 梶原伸治、田鍬紘信、脳波計測を用いたドライビングシミュレータによるドライバの負荷推定、近畿大学理工学部研究報告、45号、25-28、2009-09-15
- [39] 佐藤季久恵、川野陽慈、高屋英知、須賀聖、山内和樹、栗原聡、BGM 推薦システム構築のための VR と脳波計測を利用した潜在的間隔計測法の提案と評価、行動変容と社会システム、vol.05 (2019)、2019-03-07
- [40] 加賀翔太郎、荒川俊也、大西正敏、鼻部皮膚温度計測によるストレス検出システムの研究、日本知能情報ファジィ学会 ファジィシステムシンポジウム 講演論文集、34(0)、425-428、2018
- [41] 善住秀行、南雲和幸、野澤昭雄、田中久弥、井出英人、鼻部熱画像を用いた快-不快状態の推定、情報科学技術フォーラム一般講演論文集、2002 (3)、459-460、2002-09-13
- [42] 浅野裕俊、坂本直樹、野沢昭雄、井出英人、顔面熱画像によるドライバーの一過性覚醒度の推定、電気学会論文誌.C、電子・情報・システム部門誌=The transaction of the Institute of Electrical Engineers of Japan .C、A publication of Electronics, Information and System Society、130 (3)、428-432、2010-03-01
- [43] 林祐司、竹原隆、村井康二、矢野吉治、顔面皮膚音による操船者の心的負荷の定量化、日本航海学会論文集、116 (0)、213-218、2007
- [44] 佐藤幸光、佐藤久美子、医療安全に活かす医療人間工学、35-46
- [45] 碓井真史、鉄道事故におけるヒューマンエラー：JR 福知山線脱線事故を事例として、新潟青陵大学大学院臨床心理学研究 (1)、59-64、2007-09
- [46] 田久保宜晃、交通事故データによる運転者のヒューマンエラーと心的負荷の一考察、IATSS review=国際降雨通安全学会誌、30 (3)、299-308、2005-09-3-
- [47] 中塚健太郎、坂入洋右、計運動が監視作業時の覚醒水準と疲労の回復に及ぼす効果、スポーツ心理学研究、37 (2)、75-87、2010
- [48] 西村孝、Kinect の仕組みとナチュラルユーザインタフェース、映像情報メディア学会誌：映像メディア=The journal of the Institute of Image Information and Television Engineers、66(9)、755-759、2012-09-01
- [49] Build Insider、Kinect v1 と Kinect v2 の徹底比較 (2021年6月5日参照)
URL:<https://www.buildinsider.net/small/kinectv2cpp/01>
- [50] MONOist、「Kinect v2」はここがすごい！新旧比較と Kinect による NUI 開発の最前線 (2021年6月5日参照)
URL:<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1409/29/news026.html>
- [51] 中村薫、杉浦司、高田智弘、上田智章、KINECT for Windows SDK プログラミング Kinect for Windows v2 センサー対応版、2015
- [52] Build Insider、Kinect の座標と Unity の座標を合わせる (2021年6月5日参照)
URL: <https://www.buildinsider.net/small/bookkinectv2/0635>

- [53] カメラの顔認識の仕組みとは？顔認証と顔認識は違うもの？（2021年6月5日参照）
URL:<https://systemk-camera.jp/camera-blog/camera-system/what-face-recognition.php>
- [54] WEB カメラで利用できる顔認識技術まとめ(2015年4月)-その3（2021年6月5日参照）
URL: <http://littlewing.hatenablog.com/entry/2015/04/09/091333>
- [55] 竹森史暁、本池優菜、自動連結ロボットによる手動型車いすのための移動支援システム、日本ロボット学会誌、vol.39、No.2、159-168、2021
- [56] 佐藤一樹、能勢隆、伊藤燦、伊藤彰則、三次元顔特徴点を用いた DNN に基づく 2D フォトリアリスティック顔動画生成の検討、第 79 回全国大会講演論文集、2017(1)、101-102、2017-03-16
- [57] Microsoft Azure ホームページ、Kinect DK（2021年6月5日参照）
URL:<https://azure.microsoft.com/ja-jp/services/kinect-dk/>
- [58] engadget 日本版、米マイクロソフト、Azure Kinect DK 発表。ビジネス向けに Kinect が復活（2021年6月5日参照）
URL:<https://japanese.engadget.com/jp-2019-02-25-azure-kinect-dk-kinect.html>
- [59] 日本アビオニクス株式会社ホームページ、赤外線とは
URL:<https://www.avio.co.jp/products/infrared/what-thermo.html>
- [60] ケイエルブイ株式会社ホームページ、IoT 特集連載サイト、近赤外分光センサー・中赤外分光センサー・遠赤外線センサーそれぞれの活躍フィールド
URL:<https://www.klv.co.jp/iot/infrared-spectrometers-and-sensor.html>
- [61] 久保裕一郎、汎用モーションセンサーと赤外線センサーによる鼻部皮膚温度の自動計測、東京海洋大学卒業論文、2019
- [62] 小向華子、汎用モーションセンサーを用いた操船者の行動計測に関する基礎研究、東京海洋大学卒業論文、2017
- [63] 池田郁男、統計検定を理解せずに使っている人のために I、化学と生物、57 (8)、492-502、2019
- [64] 正規性と等分散性-愛媛大学（2021年7月4日参照）
URL: http://web.agr.ehime-u.ac.jp/~seisan/chikusou/slides/Stat14_normal%20distribution%20and%20homoscedasticity.pdf
- [65] データ科学便覧、統計学の基本事項、確率分布の詳細、各種データ解析法の理論的背景について、スチューデントの t 検定（2021年7月4日参照）
URL:https://data-science.gr.jp/theory/tst_student_t_test.html
- [66] データ科学便覧、統計学の基本事項、確率分布の詳細、各種データ解析法の理論的背景について、ウェルチの t 検定（2021年7月4日参照）
URL:https://data-science.gr.jp/theory/tst_welch_t_test.html
- [67] 奥村晴彦、Brunner-Munzel 検定（2021年7月4日参照）
URL:<https://oku.mie-u.ac.jp/~okumura/stat/brunner-munzel.html>
- [68] KMP 研究会、【オイラー角とクォータニオン】（KMP 研究会—技術講座）, Y201015

謝辞

本研究とそれに伴う論文執筆に際し、熱心なご指導とアドバイス、ご協力していただいた指導教員である西崎ちひろ准教授に深謝いたします。そして今野やよい船長、実験に参加してくださった方、助言をくださった同期、後輩の皆様に紙上をお借りして厚くお礼申し上げます。