

信州大学審査学位論文

災害対応における環境認識のための
表面性状推定に関する研究

2019年9月

松本 廣一郎

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	表面性状計測に関連する研究	6
1.4	本論文の構成	7
第 2 章	問題設定	9
2.1	本研究で扱う問題	9
2.2	表面性状の構成要素	9
2.3	表面性状計測手法	12
2.4	本研究の実行方針	12
第 3 章	接触計測による表面性状計測方法	14
3.1	はじめに	14
3.2	払い動作	15
3.2.1	払い動作による計測原理	15
3.2.2	払い装置設計	19
3.3	離し動作	21
3.3.1	離し動作による計測原理	21
3.3.2	離し動作計測装置	25
3.3.3	払い動作との連携	26
3.4	まとめ	26
第 4 章	払い動作と離し動作を用いた表面性状計測	29
4.1	はじめに	29
4.2	装置形状検討	29
4.3	払い装置形状選定実験	31
4.3.1	実験環境と実験装置	31
4.3.2	計測信号の処理方法と抵抗力の代表値	33
4.3.3	実験結果と考察	36
4.4	離し動作による表面状態の計測実験	42
4.4.1	実験環境と実験装置	42
4.4.2	実験結果と考察	43
4.5	まとめと今後の展望	45
第 5 章	表面性状を記述する特徴量	47
5.1	はじめに	47
5.2	単純な記述特徴量	47

5.3	mf_r を利用した記述特徴量	48
5.3.1	mf_r とパラメータの相関関係調査	48
5.3.2	vr 特徴量	50
5.3.3	vr 特徴量の問題点と解決方法	52
5.4	f_{ad} を用いた記述特徴量	54
5.4.1	vr_f 特徴量	54
5.4.2	可視化と vr 特徴量との比較	54
5.5	まとめ	56
第 6 章	災害対応ロボットに向けた走行可否判定	57
6.1	はじめに	57
6.2	特徴点分布と疑似特徴点生成	58
6.3	走行可能確率と特徴量の比較	61
6.4	まとめ	65
第 7 章	表面性状推定	67
7.1	はじめに	67
7.2	カーネル SVM を用いた表面性状推定	67
7.2.1	Support Vector Machine	67
7.2.2	カーネル法	69
7.2.3	表面性状推定への適用	70
7.3	表面性状推定	71
7.3.1	液体有無判別	71
7.3.2	表面の硬軟判別実験	73
7.3.3	硬軟と液体有無の同時判別	75
7.3.4	材質名+状態名推定	77
7.4	まとめ	80
第 8 章	結言	81
8.1	各章を総括したまとめ	81
8.2	本研究を総括した今後の展望	82
付 録 A		89
A.1	混合行列 (Confusion Matrix)[58]	89
参考文献		90
研究業績		95

目 次

1.1	Disaster Response System.	3
1.2	Examples of Robot Failure.	3
1.3	Water and Oil on Linoleum Floor.	5
2.1	Elements of Surface Property.	11
2.2	Schematic Diagram of Surface Property Measurement Robot.	13
2.3	Course of This Study.	13
3.1	Schematic Diagram of Wiping-motion.	16
3.2	Schematic Diagram of Surface Adhesion.	18
3.3	Schematic Diagram of Surface Viscous Friction Force.	18
3.4	Schematic Diagram of Wiping Device.	20
3.5	Schematic Diagram of Separating-motion in Vertical Direction.	22
3.6	Schematic Diagram of Separating-motion in Rotate Direction.	24
3.7	Schematic Diagram of Separating Device.	27
3.8	Measurement Procedure.	27
4.1	Five Type of Wiping Device Configuration.	30
4.2	Surface Materials.	31
4.3	Wheel Type Mobile Robot	32
4.4	Five Type of Real Wiping Device.	32
4.5	Measured Signal Processing	35
4.6	Resistance Force per Each Wiping Velocity	37
4.7	Resistance Force per Each Wiping Velocity.	39
4.8	Comparison of Resistance Force and Scratch Hardness.	41
4.9	Measurement Apparatus.	42
4.10	Time-Series Graph of Resistance Force (f_r) while Separating Motion on Acrylic.	43
4.11	Measurement Result of f_{ad} and η_{ad}	44
5.1	Coefficient of Correlation in Each Surface Material.	49
5.2	Coefficient of Correlation in Each Surface Condition.	49
5.3	Distribution of vr Feature Points.	51
5.4	vr Feature Point in Same Feature Vector Space.	53
5.5	The $vr f$ Feature Point.	55
6.1	An Example of Position and Posture Definition.	58
6.2	Schematic Diagram about Generating Pseudo Data.	59
6.3	Distribution of $v^* r f$ Feature Points with Pseudo Data.	60

6.4	Feature Points Distribution and Separating Plane of Case V.	63
6.5	Feature Points Distribution and Separating Plane of Case H.	63
6.6	Relationship Between Feature Vescor Axis and Traversable Probability in Case V.	64
6.7	Relationship Between Feature Vescor Axis and Traversable Probability in Case H.	64
7.1	Schematic Diagrma of SVM	68
7.2	Linear Inseparable Data and Mapped Linear Separable Data.	69
7.3	Feature Points Distribution about Liquid Presence	72
7.4	Result of Grid Search for Liquid Presence Estimation	72
7.5	Feature Points Distribution about Liquid Presence	74
7.6	Result of Grid Search for Hard/Soft Discrimination	74
7.7	Feature Points Distribution about Hard/Soft and Liquid Presence/Absence Estimation	76
7.8	Result of Grid Search for Hard/Soft and Liquid Presence/Absence Estimation	76
7.9	Result of Grid Search for Surface Property Name Estimation	78

表 目 次

3.1	Wiping Device Components	19
4.1	Surface Materials	31
4.2	Surface Condition	38
4.3	Condition List	42
6.1	Labeling for Traversability Estimation Depending on Liquid Viscosity.	61
6.2	Labeling for Traversability Estimation Depending on Scratch Hardness.	61
6.3	Weights of Case: V Series	62
6.4	Weights of Case: H Series	62
7.1	Liquid Presence/Absence Class Label	71
7.2	Average Estimation Rate in Liquid Presence/Absence Estimation	71
7.3	Hard/Soft Discrimination Class Label	73
7.4	Average Estimation Rate in Surface Hard/Soft Discrimination	73
7.5	Average Estimation Rate in Hard/Soft and Liquid Presence/Absence Estimation	75
7.6	Average Estimation Rate in Surface Property Name Estimation	77
7.7	Confusion Matrix of Surface Property Name Estimation	79
A.1	Confusion Matrix of Binary Classification	89

第1章 序論

1.1 研究背景

日本は、地震大国と呼ばれるほど地震が頻発している。また、国土全体が海に囲まれていることから、地震に伴った津波被害なども多い。2011年3月11日に発生した東日本大震災では、地震と津波によって福島第一原発が被災した [1]。この事故では、原発内部の状況を調査するために、遠隔操作型ロボットや自律移動型ロボットが投入された [2][3]。

被災した工場やプラントの内部状況を調査することは、被害拡大を抑えるという観点から重要であるが、人間が現地へ直接入り込むことは危険で困難である。そのような環境の調査には、遠隔操作型ロボットによる調査が望ましいと考えられる。Fig. 1.1 に本研究で想定する災害対応システムを示す。被災建物に投入されたロボットは、内部環境の情報を収集し情報を提示することで、安全な遠隔地にいるオペレータは被災状況を把握したり、搜索対象を発見する事が可能になる。

このようなロボットは、人間が到達困難な場所への移動や、ドアやバルブなどの開閉作業などを行う必要がある。そのため、投入されるロボットにはハードウェアとしての頑健さ（タフさ）と、高度なマニピュレーション機能、遠隔操縦者への情報提示機能、環境認識機能が求められる。例えば、高度なマニピュレーションの例としてドアやバルブの開閉作業などが挙げられる。戸田ら [4] はマニピュレータを搭載したクローラ型移動ロボットを用いて、マニピュレータ手先後方にカメラを取り付けることで、遠隔操縦者がその画像情報を元にドア開閉作業を行うシステムの開発を行った。戸田らの研究に例示されるように、タフなロボットを作るには不整地走行などが可能なタフなハードウェアと高度な環境認識機能を有し、得られた情報をもとにマニピュレーションを行える必要がある。

特に、環境認識機能は重要であり、座標や地図などの空間情報作成や瓦礫やバルブなどの物体情報を認識できる必要がある。空間情報認識に関する従来研究として、大野ら [5] による被災環境の密な三次元地図作成の研究が挙げられる。そこでは、不整地走行を行うクローラ型移動ロボット [6][7] に取り付けられた小型レーザー距離計を用いて、三次元地図作成を行った。Inho ら [8] はロボットに取り付けられたカメラとレーザー距離計の情報から不整地の傾斜認識やバルブ認識を行った。物体情報認識に関する研究には、Arnold ら [9] の研究が挙げられる。そこでは、ロボットに取り付けられた視覚センサから得られた画像情報と畳み込みニューラルネットワークを用いて被災環境におけるリアルタイム物体認識を実現した。ここに挙げられた環境認識機能に関する研究を組み合わせることで、センサから得られた情報を適切に処理する事が可能な賢い知能を有するロボットを作る事が可能になる。

しかし被災環境に投入されるロボットは、このようなタフなハードウェアや地図作成・物体認識ができるだけでは十分とは言えない。これらのロボットや機能は、実験室のようなきれいで整備された環境ならば十分に能力を発揮できると考えられるが、被災環境は整備された環境ではない。被災した工場などの建物内部には、油などの高粘度の液体や埃などの微小粒径の粉体が散乱している状況が考えられる。そのような表面にロボットが接触すると、液体や粉体が接触部位に付着してしまい、目的の作業を遂行できなくなる可能性がある。この

ことから、災害対応における環境認識機能には、接触する対象の性状を把握する必要があると考えられる。

液体や粉体で汚染された領域にロボットが接触する状況は、ロボットにとって好ましくない状態である。ロボットの移動について考えると、例えば Fig. 1.2(a) のように車輪型移動ロボットが油溜まりを通過した後に移動を継続すると、停止すべき崩落領域の前で停止できずに落下して破損してしまう状況が考えられる。他にも、タフな脚移動型ロボットを作成しても、埃が堆積している斜面を登坂する際に、十分な摩擦力を得られずに転倒してしまう状況も考えられる (Fig. 1.2(b))。また、移動以外では物体マニピュレーションに関しても似た状況が考えられる。例えば、油まみれのバルブを操作する場合に、バルブの表面状態を把握できないと、十分な把握力を得る事ができず、操作できない可能性がある。壊れやすい物体を把持する必要がある場合に、対象物体表面が平滑であったり油などが付着していると、十分な摩擦力が得られない。そこで、大きな把持力を出力すると、対象を破壊してしまう可能性などが考えられる。

そのような失敗を回避するために、対象の表面の性状を認識する事が望ましいと考えられる。ロボットは性状不明な領域に対して表面性状計測を行い、オペレータに表面性状情報を提示することで、オペレータは適切な指示を適用する事が可能になると考えられる。すなわち、オペレータは提示された表面性状情報を利用して、目的タスクに見合った指示（マニピュレーションにおける把握力の指定、安全な移動経路の選択など）をロボットに送る事が可能になると考えられる。ロボットが表面性状情報をオペレータに提示するためには、表面性状を計測し、認識する必要がある。しかしながら、表面性状を計測する手法は現在のところ一般的な手法が確立されていない。よって、新たな表面性状計測手法の確立が求められている。

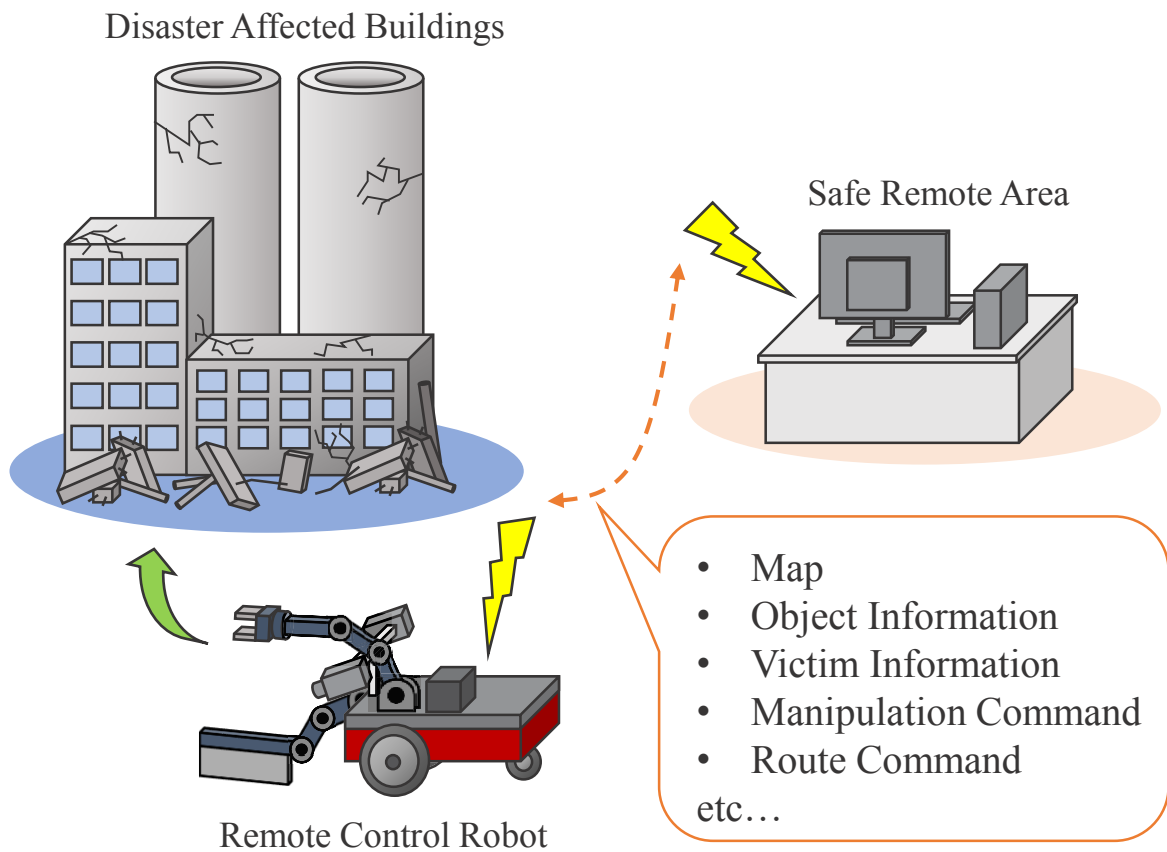


Fig. 1.1: Disaster Response System.

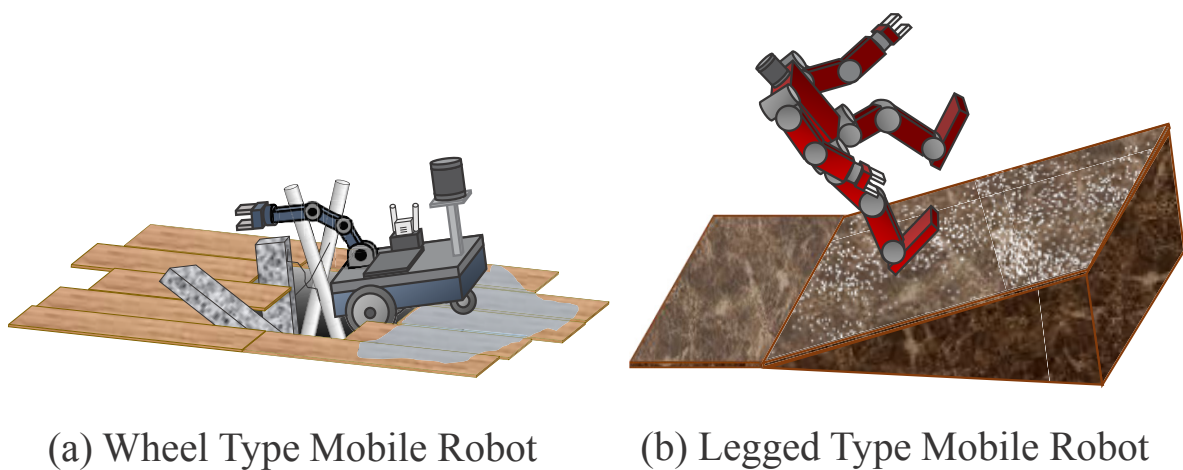


Fig. 1.2: Examples of Robot Failure.

1.2 研究目的

本研究の目的は以下の3つである。

- 新たな表面性状計測手法の確立
- 表面性状に基づく走行可否判別システムの作成
- 表面性状推定システムの作成

これらの目的は、被災した建物内部に置いて探索等を行う移動型ロボットで利用する事を前提としている。表面性状計測手法の確立には、表面材質の違い、堆積物の有無、堆積物の性質などを定量的に計測できる手法の提案、計測器の制作、提案手法の有効性検証、特徴量の提案が含まれる。また、走行可否判別システムは、走行可否判別基準の作成、走行可能確率を求める推定器の提案、提案システムの有効性検証が含まれる。表面性状推定システムの作成は、液体の有無判別、液体の種別、材質の種別を行う推定器の提案、提案システムの有効性検証が含まれる。

研究目的を達成するための最重要項目は、計測手法の確立である。表面性状計測には、視覚による方法と触覚による方法が考えられる。前者は、非接触計測であり、表面材質や堆積物の有無を推定できる可能性が高い。また、接触による計測装置の汚染や破損の危険が低く、接触計測と比較して繰り返し利用などにおいて高い優位性を持つ。しかし、視覚に基づく方法では見た目に違いが少ない対象の種別が困難であるという問題点がある。例えば、Fig. 1.3 に示すように、水と油のように物理性質は異なるが見た目が類似している対象や、透明な対象の種別 [10][11] は困難である。更に、ロボットの移動やマニピュレーションでは対象表面の摩擦力を把握する必要があるが、視覚情報のみでは摩擦力計測は困難であり、何らかの事前知識に基づく推定を用いる必要がある。

接触計測である触覚による表面性状計測では、対象表面の粗さ計測 [12]、硬さ計測 [13]、摩擦力計測 [14]、表面反力計測 [15] などが可能である。特に、摩擦力のように2物体が接触することで初めて発生する力を直接計測できるという点において、視覚情報と力推定に基づく手法よりも表面性状計測に適していると考えられる。一方で、前述の通り接触による計測装置の汚染や破損の可能性は高く、繰り返し利用性は低いと考えられる。

接触計測には、「力覚センサ」や「触覚センサ」と一般的に呼ばれるセンサが用いられる。これらのセンサは様々な計測方式が提案されており、歪みゲージ方式 [16]、感圧導電性ゴム方式 [17]、光学方式 [18]、流体方式 [19] などが開発されてきた。中でも、歪みゲージ方式を用いたセンサはロボット分野において比較的広く使われている。しかしながら、力覚/触覚センサは視覚センサと比較してまだ十分に発展しておらず、標準的と言われるセンサが存在しないのが現状である。これらのセンサ開発が視覚センサよりも遅れている原因として、触覚自体の難しさが挙げられる。

視覚情報は、一箇所に集中的に集まる情報を計測するだけで良いのに対して、触覚情報は分布した情報を計測する必要がある。分布した情報を処理することで、例えば、人間は触れた対象の質感（ざらざら、ぬるぬる、硬い、柔らかい、温かいなど）を知覚できる。すなわち、視覚情報のように集中的な情報を計測するセンサを作成するのに対して、触覚情報は分布した情報を統合して処理する必要がある。しかし、そのような分布した情報を処理するためのセンサを作るには、高い反応速度、広い分布範囲、高い分解能が求められるため、作成が困難である。現在までに提案されてきたセンサには、人間の触覚機能と同等の性能を持ち、接触対象の質感を完璧に計測できる「完全触覚センサ」 [20] はまだ存在しない。

そのような分布情報を扱うには、主に二通りの方法が考えられる。一つは、前述の「完全触覚センサ」の作成を目指す方法である。この方法は、従来の触覚センサ開発において多く採用されてきた方法である。そのため、ハードウェア開発による新たな計測方式の提案が必要となる。しかし、この方法は、非常に革新的な計測手法の提案と同時に、センサの小型高性能化、高分解能アレイ化などいくつかの技術的課題を解決する必要がある [21] とされている。

もう一つの方法として、既存の力覚/触覚センサを用いてセンシング動作を工夫するデータ処理的方法が考えられる。この方法は、既存のセンサを用いて計測目的に沿った計測動作を求める方法である。この方法により、センサ自体の改造や開発ではなく、計測対象の性質を捉えるセンシング動作を提案することで、従来のセンサでは計測が困難とされていた対象も計測できるようになることが期待される。一方で、計測動作の提案を行うこの方法は、計測対象の物理法則などを検討する必要があり、対象によっては非常に困難な問題を扱うことになる場合もある。また、得られた信号から有意な情報を抽出するにあたり、適切な信号処理方法が必要となることも考えられる。本研究では後者の立場に立って、既存のセンサを用いたセンシング動作を提案することで表面性状計測を行う。

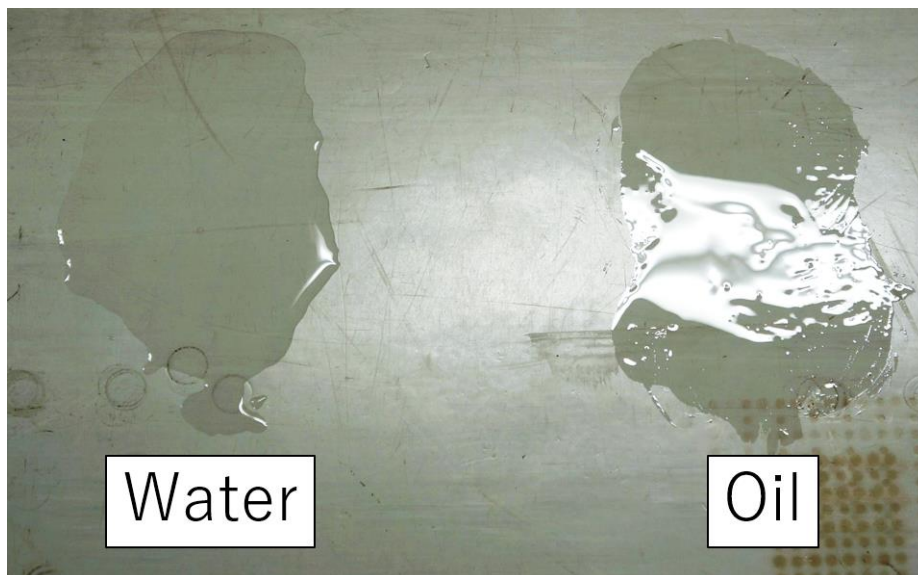


Fig. 1.3: Water and Oil on Linoleum Floor.

1.3 表面性状計測に関連する研究

表面性状推定や、移動ロボットの滑り検知に関する研究はこれまでに複数行われている。1990年代には、Holzwarthら [22] によって、レーザーセンサを利用した道路の路面状態と摩擦係数推定の研究が行われた。そこでは、道路を走行する車に搭載されたレーザーを用いて、路面に照射したレーザー光の反射量を利用し、乾燥路面、湿路面、濡れ路面の推定を行い、それぞれの状態でタイヤと路面間で発生する摩擦係数の推定を行った。同年代で類似した手法を用いた研究には、久野ら [23] による車載カメラを用いた道路の路面状態検出に関する研究が挙げられる。彼らは、レーザーを用いたアクティブな手法ではなく、太陽光による路面反射光を利用した点が Holzwarth らと異なるが、路面の表面状態を検出する手法を提案した。このような、反射光を利用した非接触な路面状態検出に関する研究は 2000 年代に入ってもいくつか行われている [24][25][26]。しかし、Holzwarth らの研究を除き、これらの研究では実際の路面の摩擦係数推定は行われていない。

摩擦係数推定を含めた非接触計測による表面性状推定に関する研究は、2010 年代に入ってからいくつか散見される。田村ら [27][28] の研究では、視覚センサで取得した移動面の画像に対してテクスチャ解析手法を用いて、路面の静止摩擦係数を推定した。そこでは、路面の摩擦係数と関係のある値として路面の表面粗さを取り上げ、画像のテクスチャ特徴量と粗さの関係を求め、予めバネ測りで計測した様々な路面の静止摩擦係数を推定する研究を行った。このように予めバネ測りなどで静止摩擦係数を計測し、画像特徴量と組み合わせて路面の静止摩擦係数を推定する手法は、Brandao ら [29] も採用しており、非接触計測による摩擦係数推定という点で一定の有効性が示されている。これらの研究では、路面摩擦係数の主要因を路面の表面粗さとしているが、屋内環境のような人の生活空間にはなめらかで平坦な面が多いため、表面粗さが大きい面は少ないと考えられる。更に、生活空間に用いられる床面などの面は、機能性やデザイン性の観点から様々な材質と見た目が用いられる。そのため、視覚特徴と材質の特徴が必ずしも一致するとは限らないという問題の他、テクスチャ情報が非常に少ない表面も多く存在することから、画像特徴量の違いが見つけられない可能性や、表面の柔らかさなどの情報を推定できない可能性がある。

さて、ロボットにおける表面性状推定は、車輪型移動ロボットの移動面推定や、脚移動型ロボットの滑り検知などへの応用が考えられる。例えば、Angelova ら [30] が行った研究のように、砂地を走行する惑星探査ロボットが滑らないような経路を検出する応用が考えられる。惑星探査ロボットは砂地を自律移動する際に、砂地にタイヤが埋まってしまい動けなくなる（スタックする）可能性がある。ロボットが砂地でスタックしてしまう状況として、スリップしてしまった後に車輪が砂地を掘削して動けなくなる状況が想定される。そのため、スリップしやすい領域を推定して回避しながら移動する必要がある。彼らは、ロボットの車体速度と車輪の回転速度の差を利用して車体の滑りを計測し、その時の画像情報と統合することで、滑りやすい領域を推定する研究を行った。脚移動型ロボットにおける滑り検知の手法としては、金子ら [31] の研究が挙げられる。この研究では、二足歩行ロボットが歩行する際に、脚部の滑り計測手法を提案した。そこでは、歩行時に期待される床反力とロボット脚部に取り付けられた力/トルクセンサから計測された実際の床反力の差分を利用して滑り検知を行っている。これらの研究は、ロボットの移動形態を利用して路面の表面性状計測を行っており、計測のために新たな装置を取り付けなくて良いという利点がある。しかしながら、被災建物の内部調査を行う災害対応ロボットでは、表面性状がわからない領域に侵入する前に、その領域の表面性状を計測、推定できることが望ましい。そのためには、ロボットの移動に用いない部位によって、表面に対して接触計測する方法が考えられる。

ロボットの移動形態を利用しない表面性状計測と推定に関する研究には、Liu ら [32] の研究が挙げられる。そこでは、マニピュレータに取り付けたロボットハンドの先端に小型の力/トルクセンサを取り付け、様々な乾いた表面を擦った際に得られる摩擦力から対象表面の表面材質を推定している。彼らは、表面を擦った際に得られる動摩擦力に対して、動摩擦力のモデルである LuGre モデル [33] を適用し、ナイーブベイズ推定器 [34] によって表面材質を推定した。この研究の優れている点は、前述した通り、ロボットの移動形態に依存しない計測動作であるという点と、表面を擦るという単純な計測動作で得られた摩擦力から表面材質の推定を行っている点である。

本研究で対象とする被災建物内部は、人間が生活する空間のため、様々な状況が想定される。Li ら [35] の研究で述べられている通り、人間の生活空間は様々な種類の平坦面が多く存在し、その表面には水や油などの液体が塗布されている可能性もある。Li らの研究では、表面の摩擦力と表面粗さの関係について調査が行われたが、表面に水や油などの液体が塗布されている場合、摩擦力が大きく低下する可能性があることを述べている。このため、様々な表面状態や表面材質を持つ面に対して表面性状推定を行うことは重要であると言える。

本研究では、Liu らのようにロボットの移動形態に依存しない表面性状計測手法を提案する。特に、様々な状態を持つ表面に対しても適用できる計測手法を提案し、検証するという点で Liu らの研究と異なる。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、本研究で扱う問題設定について述べ、表面性状を構成する要素と、表面性状計測手法について述べる。本研究では、被災建物を遠隔操作ロボットで内部調査する状況を想定し、ロボットが目的地まで移動する際に遭遇する表面性状計測について考える。本研究で対象とする表面は、移動ロボットが常に接触する床面などの平坦面とする。乾いた床面や、表面に水や油が塗布されている状態を対象とし、対象表面の表面性状を計測する手法を提案する。また、この章では表面性状計測にあたり、表面性状を「表面の性質と状態」と定義し、表面性状を構成する要素について述べる。更に、表面性状計測として表面材質と表面状態の計測を行うにあたり、視覚情報に基づく非接触計測と比較し、接触計測の利点と課題について述べる。

第 3 章では、本研究で提案する、払い動作と離し動作について、その計測原理及び計測装置について説明する。荷重をかけながら表面を撫でる「払い動作」と、接触状態にある二面を引き離す「離し動作」について、それぞれ摩擦力と粘性抵抗の理論を交えながら説明する。更に、提案計測動作の実現にあたり必要となる計測装置について、被災環境での利用という観点から必要要件を述べ、装置構成を提案する。更に、二種類の計測動作を組み合わせた表面性状計測手順について述べる。

第 4 章では、払い動作と離し動作を用いて行った表面性状計測に関する 2 種類の実験について述べる。まず、払い動作を実現する計測装置の形状選定実験について述べる。そこでは、第 3 章で提案された計測装置の形状を選択する実験を行った。実験では 5 種類の形状の計測装置を用い、それぞれで払い動作を行い、払い動作に適した装置形状を実験的に選定したことについて述べる。更に、選定された装置を用いて、水や油を塗布した表面に対して払い動作を適用し、表面性状ごとに異なる計測値が得られる事を述べ、払い動作の有効性を示す。また、4 種類の表面状態に対して離し動作を適用し、表面状態ごとに異なる計測値が得られる事を述べ、離し動作の有効性を示す。

第5章は、払い動作と離し動作によって計測された値を用いて、表面性状を記述する特徴量を提案する。払い動作によって計測される値が、表面の硬さと表面の粘性の情報を有している可能性について、相関係数行列を用いて説明する。更に、表面の硬さを表現する「平均抵抗力値」と、表面の粘性を表現する「平均変化傾向値」を提案し、これらを vr 特徴量として定義する。また、 vr 特徴量で計算される特徴点分布から、 vr 特徴量の課題について述べ、その課題を解決する方法として vrf 特徴量を提案する。

第6章では、表面性状情報を用いた走行可否判定について述べる。前章で提案した vrf 特徴量を改変した v^*rf 特徴量を提案し、 v^*rf 特徴量を用いた疑似特徴点分布を作成する。 v^*rf 特徴点の分布に対して、ロジスティック回帰によって分離平面を求め、走行可能確率を求める方法を述べる。

第7章では、提案特徴量を用いた表面性状推定システムについて述べる。 v^*rf 特徴点分布を用いて、液体の有無、液体の種別、表面材質の種別、硬さの種別を行う分類システムを提案する。

最後に第8章で本研究を総括したまとめを述べ、本論文を締めくくる。

第2章 問題設定

2.1 本研究で扱う問題

本研究で対象とする問題は、被災環境における床面の表面性状計測である。工場やプラントなどの建物は人間が生活する空間であるため、平坦な床面が多く存在する。そのような環境でロボットは、比較的平坦さの残る面を選択して目的地まで移動する。本研究ではロボットが移動する際に考えられる問題を取り扱う。

食堂や機械加工室などでは水や油などの液体を使うことから、床面にこれらの液体が散乱している可能性も考えられる。更に、人がめったに利用しない空間の場合には、床面にほこりなどの粉体が散乱している可能性も考えられる。そのため、ロボットは移動面候補となる平滑面に対して表面性状計測を行い、その材質と状態を推定する必要がある。安全な遠隔地にいるオペレーターは、ロボットから提示された表面性状情報をもとに安全な平坦面を選択し、ロボットの移動経路を決定する事が可能になる。本研究で取り扱う状況について以下にまとめる。

対象：床面などの平坦面

特徴：視覚的特徴が少なく、なめらかな平滑面

表面材質：屋内床材に用いられる一般床材

表面状態：乾燥、水濡れ、油濡れ

2.2 表面性状の構成要素

性状とは、「物の性質と状態」を表す言葉である [36]。本研究では、様々な表面を取り扱うにあたり、表面の性状を表す言葉を「表面性状」と呼ぶ。「表面性状」という言葉には明確に定められた定義と呼べるものが見受けられない。例えば、面の粗さなど表現する規格を定義している JIS 規格 (JIS B 0031 : 2003)[37] では、「表面の感覚の元になる量」として「表面性状」という言葉を用いている [38]。他方、田中ら [39] の研究や、菊上ら [40] の研究では、表面の粗さや硬さ、潤滑などの特徴を総称する意味として「表面性状」という表現がされている。本研究では、広辞苑における「性状」の定義と、田中ら、菊上らの用法を参考に、表面性状を「表面の性質と状態」として用いる。

表面性状は様々な要素で構成されており、複雑な特性をもつ。その言葉の定義に則ると、表面性状は抽象的概念であり、それ自体を物理量として直接計測して評価することは困難であると考えられる。表面性状計測に関連した研究として、白土ら [41][42] による、「質感」の認識モデルを作成する研究が行われている。そこでは、ヒトが物体を触った際に感じる質感は、4種類の因子で構成されており、「凹凸因子」、「冷たさ因子」、「湿り気因子」、「硬さ因子」に集約されると述べられている。

ヒトは高度な触覚受容器を指先に有しており、更に高度な認識機能を有しているため、凹凸、温冷、乾湿、硬軟を同時にかつ高精度で認識できる。一方、第1章で述べた通り、現在の力覚/触覚センサではそこまで高度な計測は困難である。そのため、表面性状を計測するには、表面性状を表現する物理量を計測する必要がある。そこで、表面性状を決定付ける物理量と、計測可能な物理量の関連を考慮する必要がある。

表面性状が、表面の性質と表面の状態を指すとした場合、それぞれを構成する要素について検討する。表面の性質は、主にその材質によって決定されると考えられる。材質は、表面粗さ、硬さ、形状などの要素によって決定されると考えられる。

表面の状態を示す言葉は様々であるが、本研究では材質表面における堆積物の有無、堆積物の性質のことを指すと考える。表面の状態、すなわち堆積物の性質によって表面の滑りやすさが変化する。例えば、同じ材質の表面において、乾いた状態と油が塗布された状態を考えると、油が塗布された面の方が滑りやすいと考えられる。このことから、表面状態は堆積物の性質、温度、界面活性、化学結合、形状などによって決定されると考える。

Fig. 2.1には、表面性状を構成すると考えられる要素と、その関係性を示した。同図は「潜在要素」、「計測情報」、「知覚情報」の3項目に大別されており、右の項目に行くほど「抽象度の高い情報」すなわち「高級な情報」になる。潜在要素には、表面性状を構成する細かい要素が挙げられている。潜在要素は、材質によって決まる「材質要素」と表面の状態によって決まる「状態要素」に大別される計測情報は、視覚センサや触覚センサなどの計測装置によって定量的に計測される情報を意味する。また、知覚情報は、ヒトが知覚する情報を意味している。各要素間に伸びる矢印は、根本が原因で先端が結果を意味している。これは、根本の要素は先端の要素を構成するという意味を表している。これらの要素間の関係性において、表面性状計測において特に重要となりうる関係を赤い矢印で示した。

計測情報の項目を見ると、「表面反力」、「摩擦力」、「粘性抵抗」の要素は多くの潜在要素が複雑に絡み合って構成されていることがわかる。これらの計測情報は、接触による計測で得られる情報である。更に、これらの情報は硬さや液体粘性などの要素によって構成されている。よって、表面性状計測には、表面反力、摩擦力、粘性抵抗の計測が必要であり、これらを測るためには接触計測が適していると考えられる。

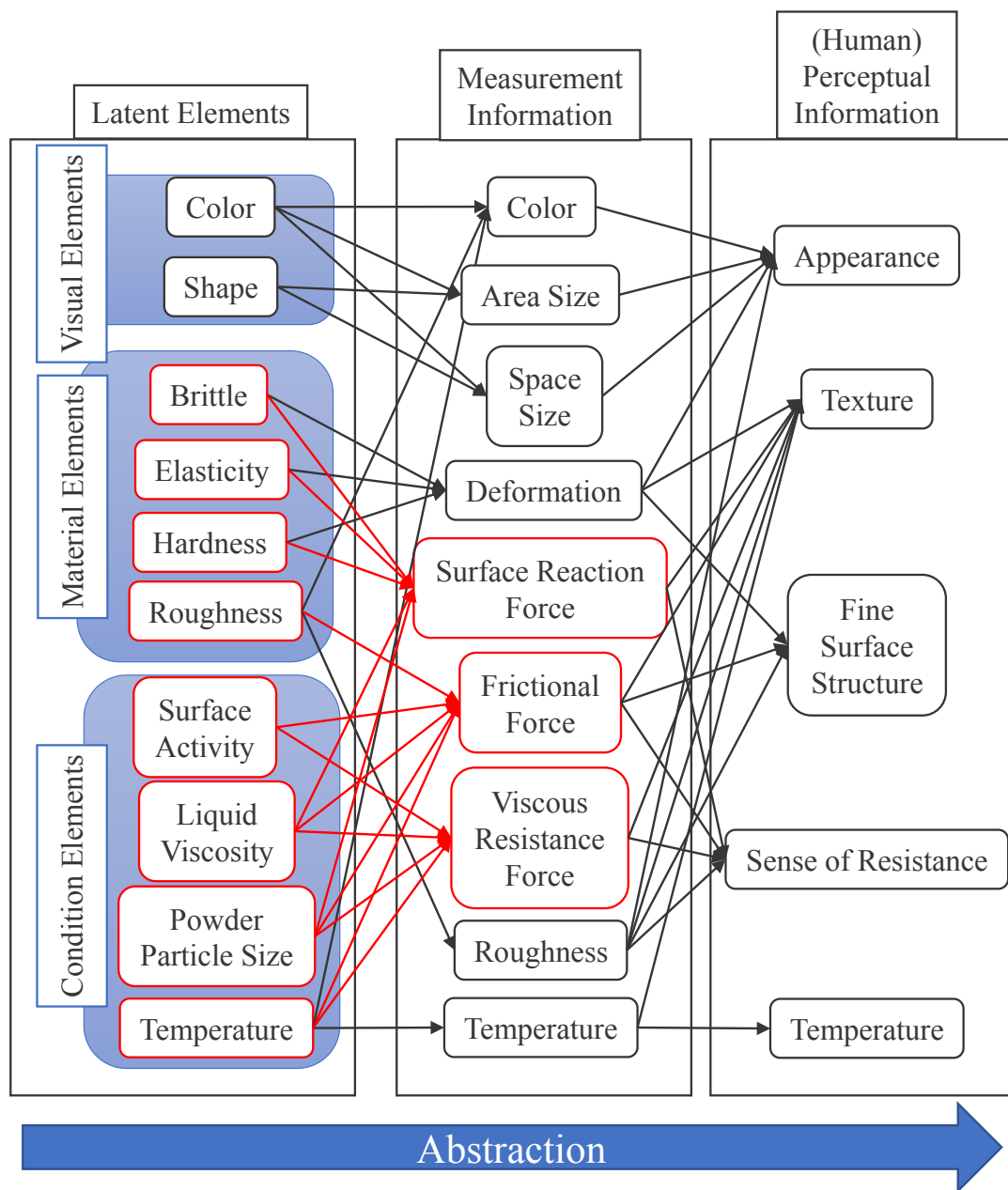


Fig. 2.1: Elements of Surface Property.

2.3 表面性状計測手法

接触計測では、Fig. 2.2 に示すように接触時の摩擦力などを計測できる力センサなどをロボットに装着し、床面などに対して接触計測を行う方法を考える。このようにすることで、性状不明な領域にロボットが侵入する前に表面性状を計測でき、遠隔操縦者に情報を提供できるという利点がある。

ロボットに取り付けたセンサで摩擦力、表面反力、粘性抵抗を計測するには、対象表面に対してセンサを摺動させたり、押し付けたり、引き離すなどの動作を行う方法が考えられる。この時、摺動速度や向きなどの条件を変えながら、これらの計測動作を行うことで、変化に富んだ情報を取得できると想定される。変化に富んだ情報から表面性状ごとに有意な差が取得できれば、表面性状情報を計測できていると考えられる。

2.4 本研究の実行方針

本研究では、表面性状計測、走行可否判定、表面性状推定を行う。これらは、基礎的項目と応用的項目であり、表面性状計測は基礎的項目に該当し、走行可否判定と表面性状推定は応用的項目に該当する。

応用的項目を達成するために本研究が採る進め方を Fig. 2.3 に示した。まず、最重要項目であり、最も基礎に該当するのが、計測動作の提案である。これは、物理現象を意識し、表面性状を表現するために必要な情報を計測できる計測動作を提案する事である。

続いて、計測値の信号処理がその次に来る。本研究に限らず、自然環境を対象とした計測では、計測値にノイズが乗ったり、計測条件によって変化することがあり、同じ対象でも安定して値を計測することは難しい。ここでは、計測信号から、比較的安定した値を取り出す処理などを行う。

計測値が安定して取得できるようになると、応用的項目のための特徴量検討が必要となる。特徴量は、様々な計測結果の特徴を上手く表現し、なおかつ単純な表現になっていることが望ましい。そのため、計測結果を様々な角度から考察する必要がある。

走行可否判定や、表面性状推定などの応用的項目は、基礎的項目が頑健であれば、単純な機械学習技術などを利用して実現できる。応用的項目は、現実の問題をより直接的に扱うものであり、汎用的であることが求められる。

本研究では、これらの項目を順に解決することで、研究目的を達成することを目指す。

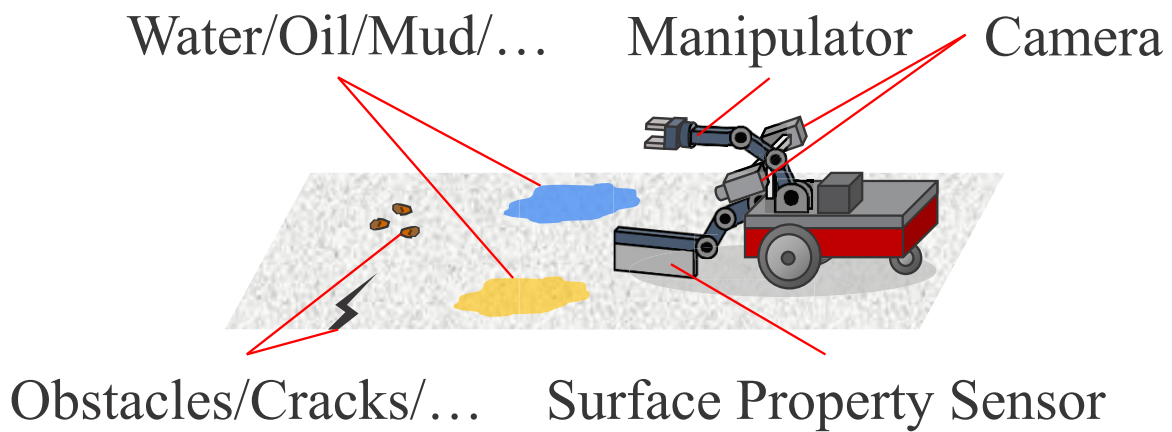


Fig. 2.2: Schematic Diagram of Surface Property Measurement Robot.

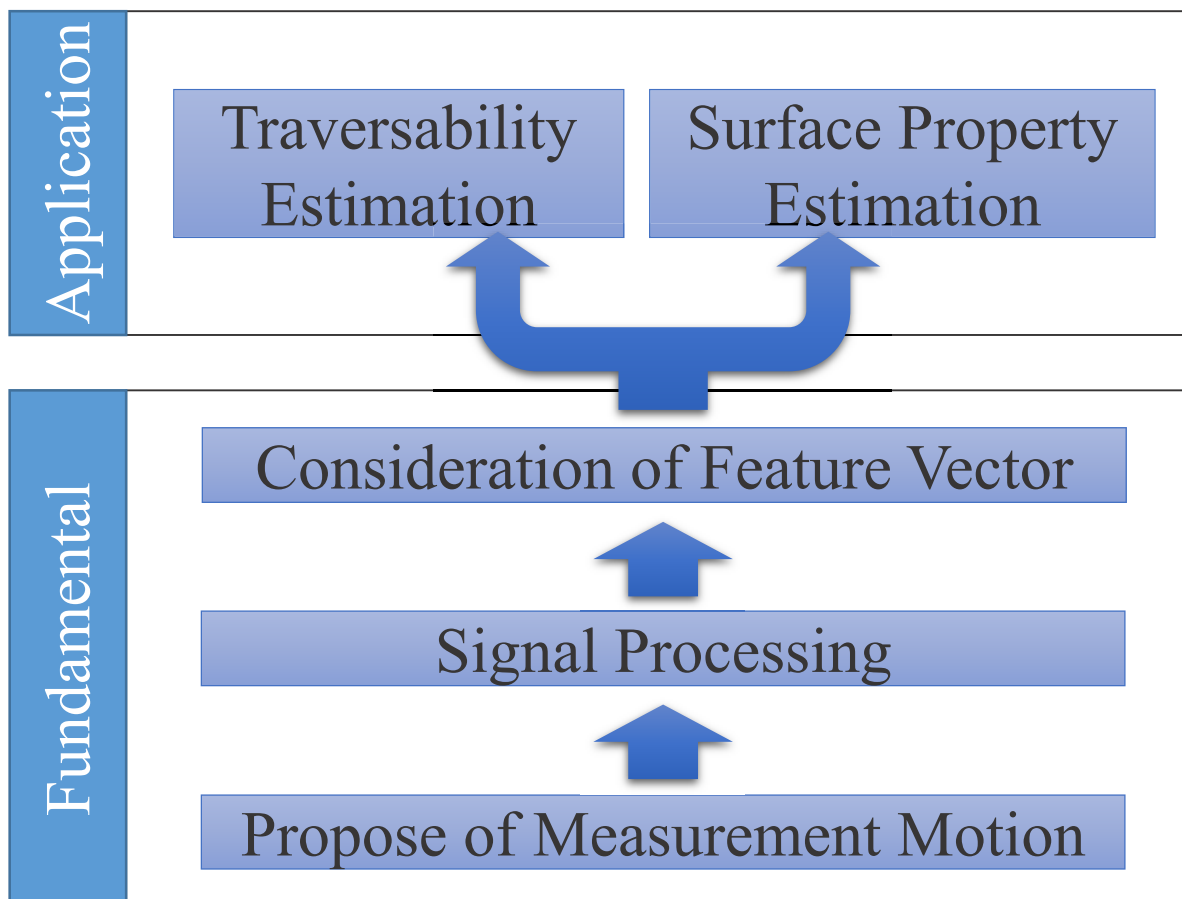


Fig. 2.3: Course of This Study.

第3章 接触計測による表面性状計測方法

3.1 はじめに

本章では、接触度計測による表面性状計測手法について述べる。力/トルクセンサを用いて接触計測を行うことで、Fig. 2.1 で挙げた表面性状を構成する要素を計測できる。特に、力/トルクセンサは、摩擦力、表面反力、粘性抵抗を計測することに適している。これらの力は第2章で述べた通り、複数の表面性状構成要素が影響する。

摩擦力は静止摩擦力と動摩擦力が存在しており、接触した2物体の相対関係によってその値が決まる。摩擦力 f の支配式は一般に以下の式で知られている。

$$f = \mu f_n \quad (3.1)$$

式中の μ , f_n はそれぞれ摩擦係数と垂直抗力である。摩擦係数 μ は、静止摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_d で表され、一般的に $\mu_d < \mu_s$ となっている。

この摩擦係数 μ は接触する2物体の材質、接触状態、表面の特性（粗さ、硬さなど）によって様々な値となるため、垂直抗力 f_n の大きさが同一でも接触する物体が異なると摩擦係数 μ は異なる値を持つ。そのような摩擦係数 μ と摩擦力の関係についての研究は、過去に多数実施されており [43]、トライボロジーなどの分野で引き続き研究が行われている。

また、式 (3.1) に着目すると、この式が成立するためには接触する2面のどちらも弾性/塑性変形しないという前提が必要となる。表面が変形する場合の摩擦係数 μ の挙動については、式 (3.1) のみでは説明が困難であると考えられる。さらに、そのような場合における摩擦係数 μ の計測は困難になる事が想定される。

以上の理由から推察される事として、接触計測で表面性状を計測する場合に、摩擦係数 μ のみに着目するとなると、ある一組の素材同士の組み合わせだけで少なくとも3つの項目を検討する必要がある。すなわち、「静止摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_d の大きさの違い」、 「摩擦係数 μ の正体と構成要素」、そして「表面が変形する場合における摩擦係数 μ の挙動と摩擦係数 μ の変化」である。これらの項目を分析することは、科学的に有意義であり、チャレンジングな課題であるが、非常に多くの要素について深く検討する必要がある、困難であると考えられる。加えて、本研究が対象とする建物内部には様々な材質や特性を持った表面が多く存在するため、接触する2面の組み合わせ数が多くなる。すなわち、表面性状計測において様々な表面を対象とする場合、摩擦係数 μ のみに着目して分析を行うのは多くの課題を含む事となりうる。

本研究では、摩擦係数 μ を扱うことで発生しうる前述の課題を直接扱うのではなく、面を接触させて摺動させる際に発生する抵抗力 f_r を扱う。そうすることで、接触によって発生する物理現象をシンプルに扱うことが可能になると考えられる。一方で、対象をシンプルに扱うため、これらを分析するためには多様なパターンの計測結果が複数必要となる。この条件によって、バリエーション豊かな対象を計測でき、複雑な物理現象の解明を直接扱わないで済むようになると考えられる。

本研究では、接触計測による表面性状計測手法として、摩擦力と表面反力を計測できる“払い動作 (Wiping-motion)” と表面接着力を計測できる“離し動作 (Separating-motion)” を

提案する。これらの計測動作において、表面が発生する抵抗力を直接計測することで、 μ に依存せずに表面性状を計測できると考えられる。

3.2 払い動作

3.2.1 払い動作による計測原理

払い動作とは、荷重をかけながら計測対象表面を撫でる動作である。Fig. 3.1に払い動作の概要図を示す。

払い動作を行うと、表面から力を受ける。表面に荷重をかけると垂直抗力が発生する。また、接触状態で表面を撫でるとそこには摩擦力が発生する。更に、対象表面がせん断変形すると、元の状態に戻ろうとする復元力（せん断抵抗）が発生する。これらの力を抵抗力 f_r とすると、抵抗力 f_r は、動摩擦力 f_d と垂直抗力 f_n およびせん断抵抗力 f_s で構成されることができると考えることができる。また、垂直抗力 f_n とせん断抵抗力 f_s の合力を表面反力 f_{sr} と考えると、抵抗力 f_r は次式で表されることが考えられる。

$$f_r = f_d + f_{sr} \quad (3.2)$$

$$f_{sr} = f_n + f_s \quad (3.3)$$

ここで、 f_r を抵抗力とし、 f_{sr} を表面反力とした。また、表面反力 f_{sr} の構成要素である垂直抗力を f_n 、表面せん断抵抗を f_s とした。払い動作とは、これらの力によって構成される抵抗力 f_r を発生させ計測する動作である。

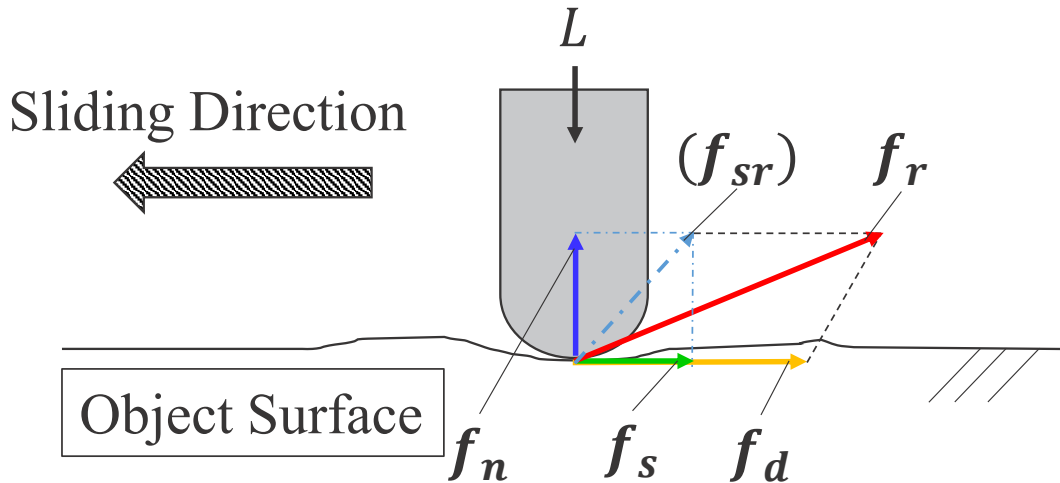


Fig. 3.1: Schematic Diagram of Wiping-motion.

払い動作で計測される抵抗力 f_r は、接触状態に応じて変化する。例えば、荷重 L が小さい場合や接触状態を含めた系が不安定な場合にはスティック-スリップ（付着-滑り）[44] と呼ばれる自励振動が発生することがある。スティック-スリップは、2物体が接触した状態で片方が静止状態から動き始める瞬間、すなわち摩擦力が静摩擦から動摩擦へ変化する際に発生しやすく、摩擦力が大きく変化する。しかし、スティック-スリップは、上記の通り系が比較的不安定なときに発生する振動であり、安定した抵抗力計測という観点からは望ましくない。

抵抗力を構成する動摩擦力 f_d と表面反力 f_{sr} に着目する。動摩擦力 f_d は表面の滑りやすさや粗さによって変化する。また、表面反力 f_{sr} は、表面の柔らかさによって変化すると考えられる。例えば、シリコンのように柔らかい表面は軽い力で容易にせん断変形する一方で、金属のような硬い表面をせん断変形させるには非常に大きな力を要する。このことから、払い動作は表面性状によって様々な値を持つと考えられる。

この抵抗力の問題点として、異なる表面状態が同一の抵抗力を示す場合に違いを見つけることが困難であるということが挙げられる。これは、抵抗力が複数の力によって構成される合力だからである。そこで、本研究では表面を撫でる速度（以下、払い速度 v_w と呼ぶ）を様々に変化させる事で違いを発生させる。これは、表面反力 f_{sr} と動摩擦力 f_d が速度に依存して変化すると考えられるためである。

摩擦の発生メカニズムは非常に複雑である。そのため、一般的には動摩擦力 f_d は摺動速度にかかわらず一定値であるとされている。摩擦の正体に関しては古くから議論されており、様々な説が提唱されてきた。その中でも単純な摩擦の理論として、摩擦の凝着説 [45][46] が挙げられる。これは、乾燥した表面における摩擦力 f が次式に示されるように、凝着項 f_a と掘り起こし項 f_d で構成されているとする理論である。

$$f = f_a + f_d \quad (3.4)$$

$$\simeq f_a (\because f_d \ll f_a) \quad (3.5)$$

すなわち、摩擦の凝着説では摩擦力とは凝着領域をせん断する力であるとされている。

Fig. 3.2 に、接触する二面の断面模式図を示す。2つの平面が接触状態にあるとき、これらは面接触ではなく、各面に存在する微小凹凸同士の点接触であると考えられる。微小凹凸領域は、真実接触点と呼ばれている。真実接触点の面積は微小であることから、各真実接触点には大きな圧力がかかっていることになる。この圧力によって接触した2面の真実接触点同士は凝着し、一体となると考えられる。真実接触点の総面積を A_r 、各真実接触点の面積を $A_r^{(i)}$ とし、各点にかかる荷重を L_i 、塑性流動圧力を p_0 とすると以下の関係が成り立つとされている [47]。

$$A_r = \sum_i A_r^{(i)} \quad (3.6)$$

$$= \sum_i \frac{L_i}{p_0} \quad (3.7)$$

$$= \frac{L}{p_0} \quad (3.8)$$

ここで、 s_0 を凝着部のせん断強さとする、凝着項は以下の式で表せることになる。

$$f_a = A s_0 \quad (3.9)$$

$$= \frac{L}{p_0} s_0 \quad (3.10)$$

$$= \frac{s_0}{p_0} L \quad (3.11)$$

凝着部は、接触時間に伴って成長すると考えられている [48]。このことから、乾燥状態における動摩擦力は、滑り速度によって変化すると考えられる。

凝着説では、乾燥した面同士の接触について述べたが、面間に液体などの流体が介在する場合には摩擦力は粘性摩擦として現れる。Fig. 3.3 には、粘性摩擦が発生する状態の概念図を示した。2面間に相対的な滑りがある場合を考えると、流体によって発生する粘性摩擦力はレイノルズ方程式 [49] から求めることができる。以下に x 軸方向及び y 軸方向にかかる粘性摩擦力 $v f_x$, $v f_y$ を示す。

$$v f_x|_{z=h} = \iint \left(\frac{\eta(u_1 - u_2)}{h} \mp \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} \right) dx dy \quad (3.12)$$

$$v f_y|_{z=h} = \iint \left(\frac{\eta(v_1 - v_2)}{h} \mp \frac{h}{2} \frac{dp}{dy} \right) dx dy \quad (3.13)$$

式中の η_{avg} は流体の平均粘度、 h は2面間の距離、 $u_i, v_i (i = 1, 2)$ はそれぞれ x 軸、 y 軸方向の流速、 p は圧力とした。式中に流体流速の項が含まれていることからわかるとおり、粘性摩擦力は滑り速度に依存する関数であると考えられる。

以上より、払い動作で計測される抵抗力 f_r は、払い速度 v_w によって変化すると考えられ、 f_r の大きさや v_w に対する変化傾向は表面性状ごとに異なると考えられる。

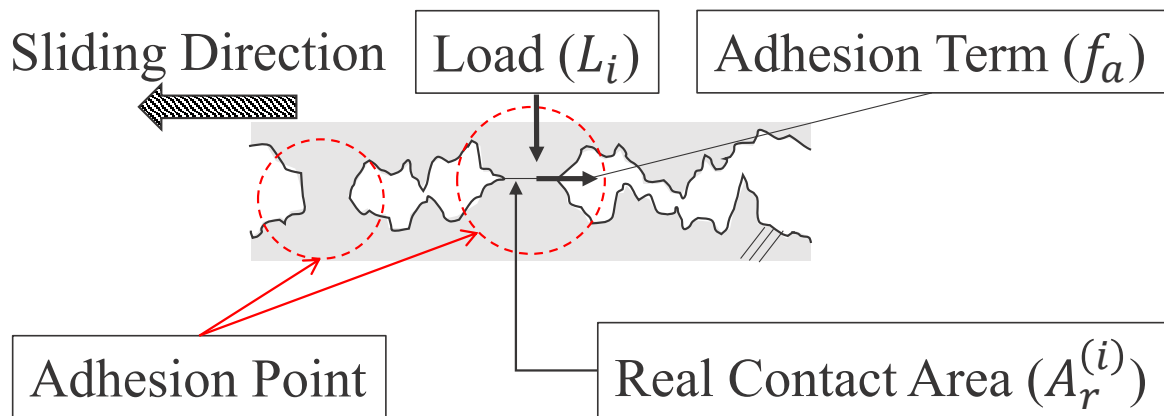


Fig. 3.2: Schematic Diagram of Surface Adhesion.

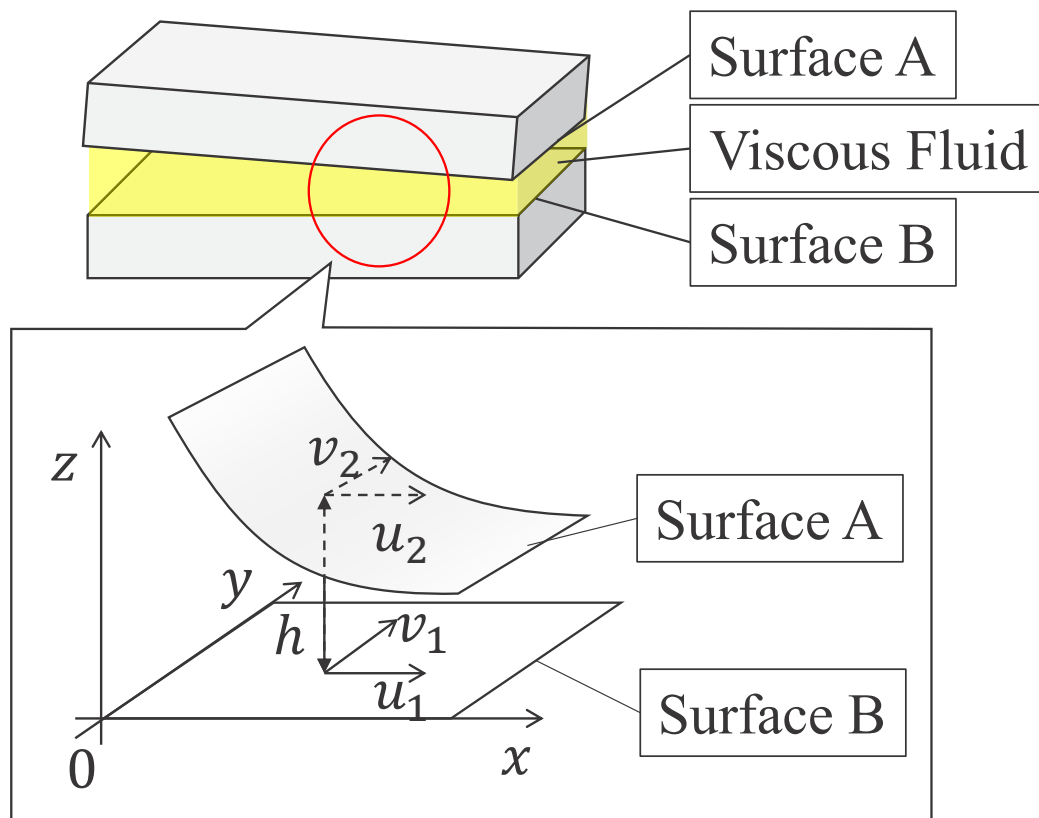


Fig. 3.3: Schematic Diagram of Surface Viscous Friction Force.

3.2.2 払い装置設計

払い動作を実現する計測装置は、被災建物内部における利用を想定している。このため、計測装置には高い頑健性が求められる。計測装置に高い頑健性をもたせるには、個々が脆弱なセンサを利用したセンサアレイや、複雑な機構を用いない事が考えられる。また、被災建物内部の表面は様々な状態が考えられる。例えば、水や油などの液体が存在している領域に対して払い動作を適用するとき、計測対象の表面状態などによって計測装置が破損することは避けるべきである。そのためには、接触計測で用いる力センサと対象表面を直接接触させない対策方法が考えられる。すなわち、センサ表面を硬い材質で覆い接触計測を行うという方法である。この対策方法によって、センサの破損や汚染を回避できると考えられる。

払い動作において、計測装置の接触面は常に対象表面に曝されるため、装置の接触領域は表面の状態に依存して付着物がつく恐れがある。接触領域に付着物が存在する状態で繰り返し払い動作を行うと、抵抗力を誤計測する可能性が高くなる。例えば、油が塗布された表面に対して払い動作を行った後に、乾いた表面で払い動作を行うと、本来計測される値よりも低い抵抗力が計測されることが考えられる。このような誤計測回避のためには、計測装置の接触領域を常に清浄に保つ必要がある。接触領域を清浄に保つ方法として、接触領域自体を換装可能なカバーなどで覆う方法が考えられる。払い動作を行った後にカバーを換装することで、接触領域を清浄に保てる。

以上の前提に基づいて、本研究で提案する計測装置を Fig. 3.4 に示す。なお、本研究では Fig. 3.4 に示される構成の計測装置を“払い装置 (Wiping Device)”と呼ぶ。払い装置の構成要素を Table 3.1 に示す。

Table 3.1: Wiping Device Components

Component Name	Material
6-axis Force Sensor	N/A
Sensor Link	ABS Plastic
Free Joint	N/A
Contact Plate	ABS Plastic
Cover Sheet	Stainless Steel

6軸力覚センサは、払い動作で発生する抵抗力を計測するために用いる。センサからはリンクが伸びており、リンクは自由回転軸に接続されている。払い動作は、表面に荷重をかけながら撫でるため、表面のうねりに沿ってセンサが上下に動く必要がある。そのため、回転軸はセンサ上下動を阻害しないように、自由回転とすることが望ましい。接触板は、計測対象表面と力センサ表面の直接接触を回避するために用いる。接触板によって、払い装置自体の頑健性を高くできると考えられる。

接触板を覆うカバーは、脱着可能な形となっており、接触領域の清浄さを保つ目的で用いられる。カバーの材質には硬い金属のステンレスを用いる。カバーに硬い材質を利用する利点に、計測値の安定性が挙げられる。3.2.1 で述べた通り、接触計測において系が不安定になるとスティック-スリップという自励振動が発生することがある。払い動作では動摩擦力と表面反力からなる抵抗力を計測するため、自励振動は望ましくない。柔らかいカバーを用いると、表面を撫でる際になめらかに進まず、振動する可能性がある。この振動を発生させないためにも、硬い材質が望ましいと考えられる。

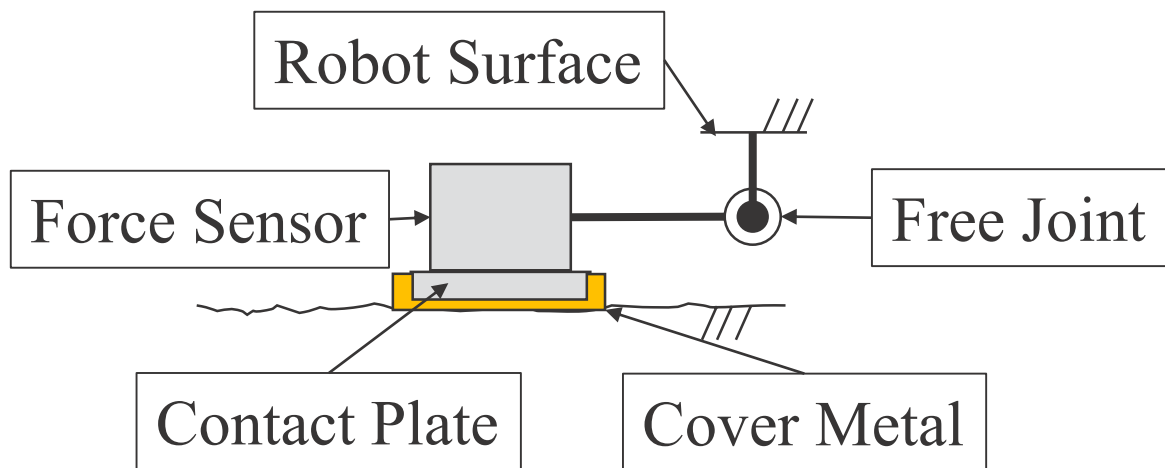


Fig. 3.4: Schematic Diagram of Wiping Device.

3.3 離し動作

3.3.1 離し動作による計測原理

本節では、表面状態計測手法として離し動作について述べる。離し動作 (*Separating-motion*) とは、接触状態にある面同士を引き剥がす動作を指す。離し動作で面同士の接着力を計測できると考えられる。

接着力を求めるにあたり、粘性抵抗の基本を再確認する。今、Fig. 3.5 に示すように平滑な2面が水や油などの粘性を持つ流体を介して接触している状態で、片方を面の法線方向に引っ張って剥離する事を考える。下側の面の大きさは無限とし、上側の面の大きさは有限とする。また、2面の間隔は十分小さいとし、上側の面を動かす区間も微小と考え、2面から液体の剥離は無いものとする。このとき上側の面を引っ張ると、面間には粘性流体による粘性抵抗 f_v が発生する。粘性抵抗 f_v は、剥離速度 v_p と粘性減衰係数 c を用いて以下の式で表されると考えられる。

$$f_v = cv_p. \quad (3.14)$$

この粘性抵抗を積分を用いて求めてみる。Fig. 3.5 下部には鉛直持ち上げによる離し動作の図を示した。この図は、ある時刻 t における離し動作を示しており、図中の灰色領域は、表面との全接触領域を意味している。

灰色領域を x 軸 y 軸に沿って細かく区切ったときの微小領域を dS とする。 dS で発生する微小粘性抵抗を df_v とすると、全接触面における総粘性抵抗は、以下の式で求められる。

$$f_v = \int_D df_v dS, \quad (3.15)$$

$$df_v = \frac{c}{A} v(x, y), \quad (3.16)$$

$$dS = dx dy, \quad (3.17)$$

$$v(x, y) = \frac{dz}{dt}, \quad (3.18)$$

$$= v_p. \quad (3.19)$$

なお、 A は全接触面積である。

$l_x l_y = A$ に注意し上式を計算すると、面全体における粘性抵抗は次式で表される。

$$f_v = \int_D \frac{c}{A} v_p dS, \quad (3.20)$$

$$= \int_r^{r+l_y} \int_r^{r+l_x} \frac{c}{A} v_p dx dy, \quad (3.21)$$

$$= \frac{c}{A} v_p l_x l_y, \quad (3.22)$$

$$= cv_p \quad (\because l_x l_y = A). \quad (3.23)$$

この結果は、式 (3.14) と同じ結果となっている。

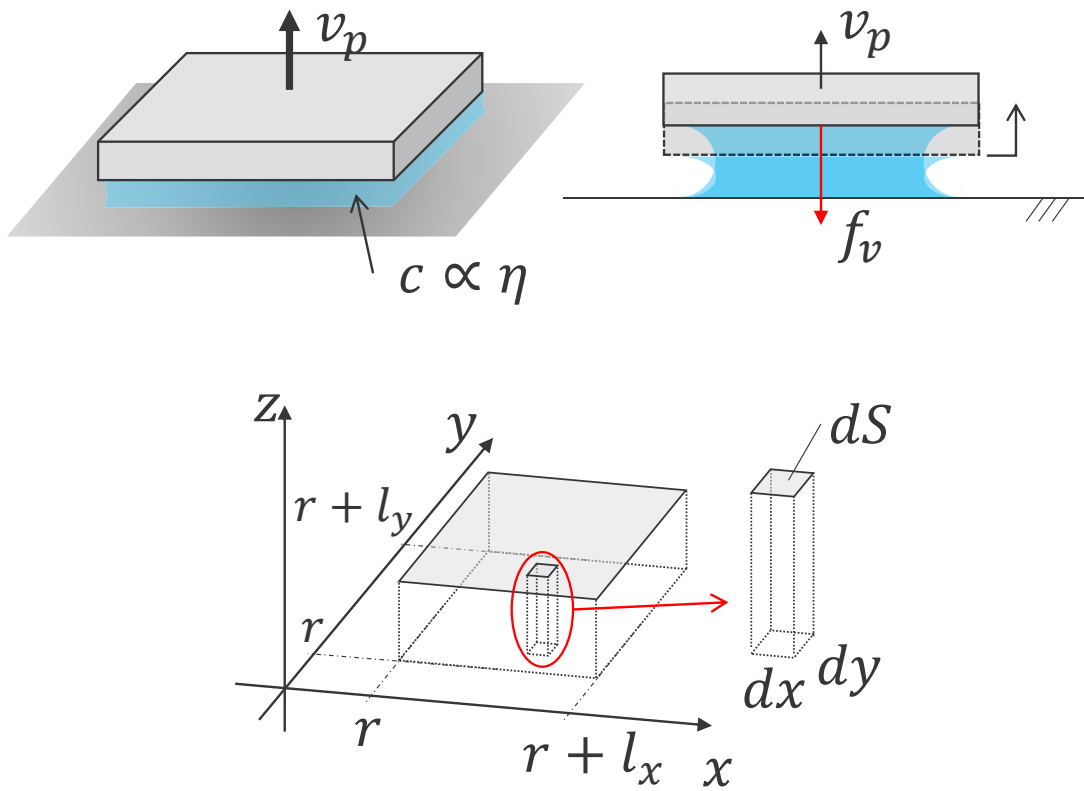


Fig. 3.5: Schematic Diagram of Separating-motion in Vertical Direction.

この方法を、同様の条件として、回転による引き離しに適用する。Fig. 3.6 に回転持ち上げによる離し動作の図を示した。回転持ち上げでは、 x 軸を回転軸として、 x 軸から r 離れた面を回転速度 $\dot{\theta}(t)$ rad/sec で持ち上げる。鉛直持ち上げによる離し動作と同様に、微小領域 dS における微小粘性抵抗 df_v を全領域について積分することで、総粘性抵抗を求める。

$$f_v = \int_D df_v dS, \quad (3.24)$$

$$df_v = \frac{c}{A} v(x, y), \quad (3.25)$$

$$dS = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy, \quad (3.26)$$

$$z = y \tan \theta(t), \quad (3.27)$$

$$v(x, y) = y \dot{\theta}(t). \quad (3.28)$$

各条件を代入して、総粘性抵抗を求めると、以下のようになる。

$$f_v = \int_D df_v dS, \quad (3.29)$$

$$= \int_{r \cos \theta(t)}^{(r+l_y) \cos \theta(t)} \int_r^{r+l_x} \frac{c}{A} y \dot{\theta}(t) \sqrt{1 + \tan^2 \theta(t)} dx dy, \quad (3.30)$$

$$= \frac{c}{A} \dot{\theta}(t) \sqrt{1 + \tan^2 \theta(t)} \frac{1}{2} (l_y + 2r) \cos \theta(t) l_x l_y, \quad (3.31)$$

$$= c \dot{\theta}(t) \frac{1}{\cos \theta(t)} \left(\frac{l_y}{2} + r\right) \cos \theta(t) \quad (\because l_x l_y = A), \quad (3.32)$$

$$= c \dot{\theta}(t) \left(\frac{l_y}{2} + r\right). \quad (3.33)$$

この結果は、 f_v は持ち上げる面の中央を代表点として、その点に働く力を求めればよいことを示している。

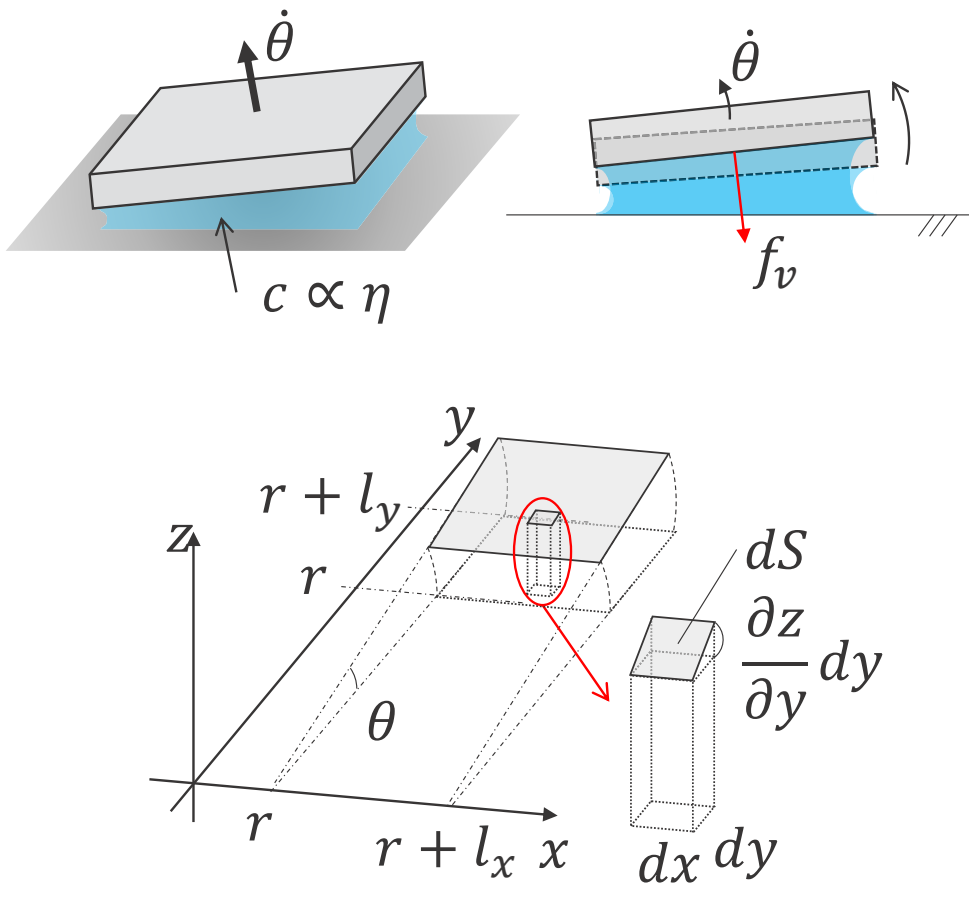


Fig. 3.6: Schematic Diagram of Separating-motion in Rotate Direction.

式 (3.19) と式 (3.33) の結果から、2 面間に介在する流体を変えた場合、 v_p または $\theta(t)$ を同一かつ一定値とすると、 f_v は c によって決定されることが分かる。粘性減衰係数 c は、流体粘度 η に関係すると考えられるため、微小な持ち上げにおける f_v は η に依存すると考えられる。

式 (3.19) および式 (3.33) で得られた結果は、液体が面から剥離しないという条件において、微小に面を動かした場合に発生する粘性抵抗として考えた。しかし、面を液体から完全に引き離し、液体が面から剥離する場合は、これらの式が成立するとは限らない。そのような場合では、上述のような単純な計算ではなく、流体の圧力と雰囲気圧力の関係や速度勾配についても検討が必要であり、非常に複雑な問題となる。このような問題に対しては、様々な取り組み [50][51] が行われており、いくつかのモデルが提案されている。流体の剥離がある対象における粘性抵抗のモデル化は、非常に興味深い対象ではあるが、本研究ではモデル化は行わず粘性抵抗が粘度 η に依存する値と捉えて扱う。

面を液体から完全に引き離す場合、粘性抵抗 f_v は液体が面から完全に剥離すると $f_v = 0$ となる。そこで、面を剥離する速度 (v_p , $\dot{\theta}(t)$) 及び接触面積 (A) を一定とした場合に計測される f_v の最大値を、接着力 f_{ad} とし、以下の式で定義する。

$$f_{ad} \equiv \max(f_v), \quad (3.34)$$

$$\propto \max(\mathbf{f}_r). \quad (3.35)$$

更に、剥離中に液体が面に加える単位面積当たりの力積を接着粘度 η_{ad} として以下の式で定義する。

$$\eta_{ad} \equiv \frac{1}{A} \int_{t_s}^{t_m} |\mathbf{f}_r| dt. \quad (3.36)$$

なお、(3.36) 中の A は面の接触面積を指し、 t_s , t_m はそれぞれ離し動作開始時刻と、 $|\mathbf{f}_r| = f_{ad}$ となる時間を指す。この値の単位は液体粘度 η の単位と同一で、 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ となるため接着粘度と呼称した。

接着力 f_{ad} と接着粘度 η_{ad} は流体粘度 η によって変化する値と考えられるため、表面状態を表現する計測値と考えられる。すなわち、離し動作とは表面状態のみを表す値を計測する動作である。

3.3.2 離し動作計測装置

離し動作の実現は、払い装置を計測対象表面から少し持ち上げるだけで良い。よって、払い装置を再利用する事が可能であり、装置を持ち上げる上下動機構を追加するだけで実現可能になる。

離し動作を実現する装置は、Fig. 3.7 に示す構成が考えられる。本装置は、Fig. 3.4 に示す払い装置に、モータと持ち上げアームを追加した構成となっている。離し動作実行時には、アームに接続されたモータが一定角度まで回転する。持ち上げアームは、自由回転軸と力覚センサをつなぐリンクを下からすくい上げる。アームがリンクに接触すると、リンクが持ち上げられ、先端のセンサ部分が計測対象表面から引き剥がされる。また、離し動作実行中以外ではアームとリンク部の間には隙間があり接触していないため、払い動作中に発生する表面のうねりによるリンクの上下動には影響を及ぼさないようになっている。

3.3.3 払い動作との連携

離し動作は静止した状態で、計測装置を一定速度で持ち上げることで接着力 f_{ad} を計測できる。この動作は、払い動作と独立しているため、組み合わせが容易であり親和性が高い。

払い動作と連携した表面性状計測は、Fig. 3.8 に示すように離し動作と払い動作の組み合わせで行われる。計測手順は以下の (1) から (3) を繰り返して行われる。

- (1) 離し動作により、接着力 f_{ad} を計測する。
- (2) 一定の払い速度 v_w で払い動作を行い、抵抗力 f_r を計測する。
- (3) 払い速度 v_w を変更する。

離し動作と払い動作を交互に行うことには、以下の利点がある。払い動作は、停止の瞬間に抵抗力 f_r が残留するため、停止後に続けて払い動作を繰り返すと計測誤差が発生する。この計測誤差解消のためには、センサを持ち上げて残留した抵抗力を消す必要がある。このリセット動作は払い速度 v_w を変える度に必要となる。離し動作は、センサを計測対象表面から持ち上げる動作であるため、 f_{ad} を計測すると同時にセンサのリセット動作も行う事が可能となる。

3.4 まとめ

本章では、表面性状計測手法として払い動作と離し動作について説明した。払い動作とは、荷重をかけながら表面を撫でる動作であり、動摩擦力と表面反力からなる抵抗力 f_r を計測できる。また、払い動作を行う速度（払い速度）を様々に変えて払い動作を適用することで、表面性状ごとに異なる f_r を計測できると考えられる。

離し動作は接触状態にある 2 面を引き離す動作であり、表面の接着力 f_{ad} を計測する動作である。 f_{ad} は粘性抵抗の最大値で定義されており、2 面を引き離す速度を一定とすると、液体粘性によって変化すると考えられる。

払い動作と離し動作は互いに独立した計測動作であるため、組み合わせが容易で親和性が高い。これらの計測動作を交互に行うことで、表面性状を計測できる。

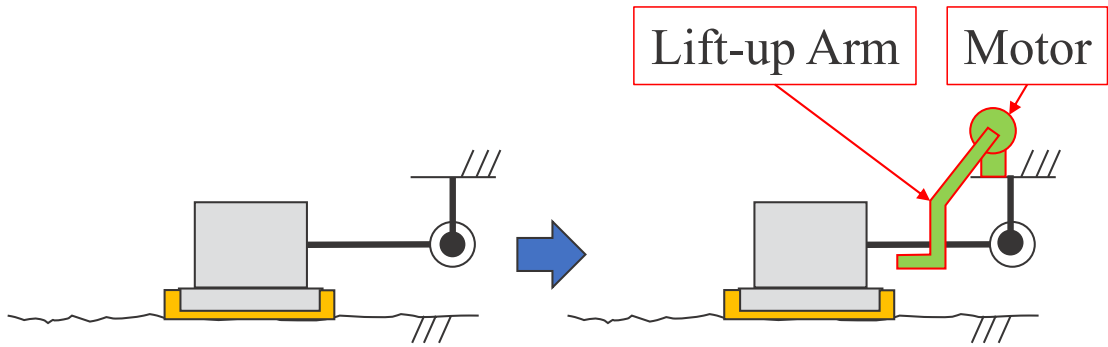


Fig. 3.7: Schematic Diagram of Separating Device.

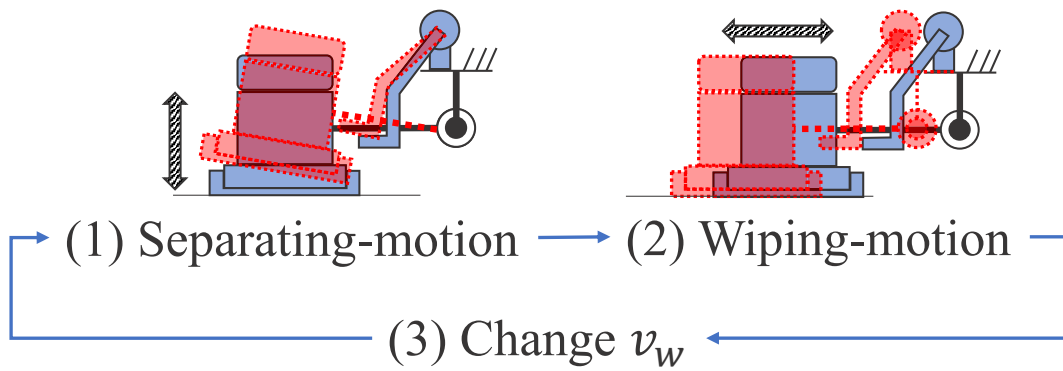


Fig. 3.8: Measurement Procedure.

第4章 払い動作と離し動作を用いた表面性状計測

4.1 はじめに

本章では、表面性状計測手法として提案した払い動作と離し動作を用いて表面性状を計測し、手法の有効性を示す。また、払い動作と離し動作を実現するにあたり、計測装置を作成する必要がある。本研究では、Table 3.1 に挙げた要素を用いて計測装置を作成し、表面性状計測動作に適した計測装置を実験的に求める。

まず、提案装置の根本となる払い装置の形状決定を行うため、複数形状の払い装置から安定したデータを取得できる装置形状を決定する実験を行う。続いて、様々な表面性状に対して払い動作を適用し、表面性状ごとに計測値が異なる事を示し、払い動作の有効性を示す。離し動作の有効性検証実験では、形状選定実験で決定した払い装置に昇降機構を取り付け、様々な表面性状に対して離し動作を適用する。離し動作によって、表面性状ごとに異なる接着力が得られる事を示し、離し動作の有効性を示す。

4.2 装置形状検討

Table 3.1 に示された要素を用いた払い装置には検討すべき構成が複数考えられる。センサと接触板の接続方法、センサの向き、回転軸位置、計測対象表面にかかる荷重が検討要素である。Fig. 4.1 には、複数の払い装置を示した。図中の各装置は、車輪型移動ロボット前縁部に取り付けられている状態を想定している。各装置特徴を以下に示す。

Type A: センサと接触板を 2 mm 厚のアルミ板で接続。地面に対するアルミ板の傾斜角 ϕ は 60° 。センサ表面とアルミ板は平行、センサ表面の地面に対する傾斜角は 60° 。回転軸はセンサ取り付け位置より高い位置。

Type B: センサと接触板を 2 mm 厚のアルミ板で接続。傾斜角 ϕ は 90° 。センサ表面とアルミ板は平行、センサ表面の地面に対する傾斜角は 90° 。回転軸はセンサ取り付け位置と同じ位置。

Type C: センサと接触板を 2 mm 厚のアルミ板で接続。傾斜角 ϕ は 120° 。センサ表面とアルミ板は平行、センサ表面の地面に対する傾斜角は 120° 。回転軸はセンサ取り付け位置より低い位置。

Type D: センサ表面に接触板を直接接続。センサ表面は地面と平行。回転軸はセンサ取り付け位置と同じ位置で、地面に近い位置。センサ上部に 400 g のおもりを搭載。

Type E: センサ表面に接触板を直接接続。センサ表面は地面と平行。回転軸はセンサ取り付け位置と同じ位置で、地面に近い位置。センサ上部に 800 g のおもりを搭載。

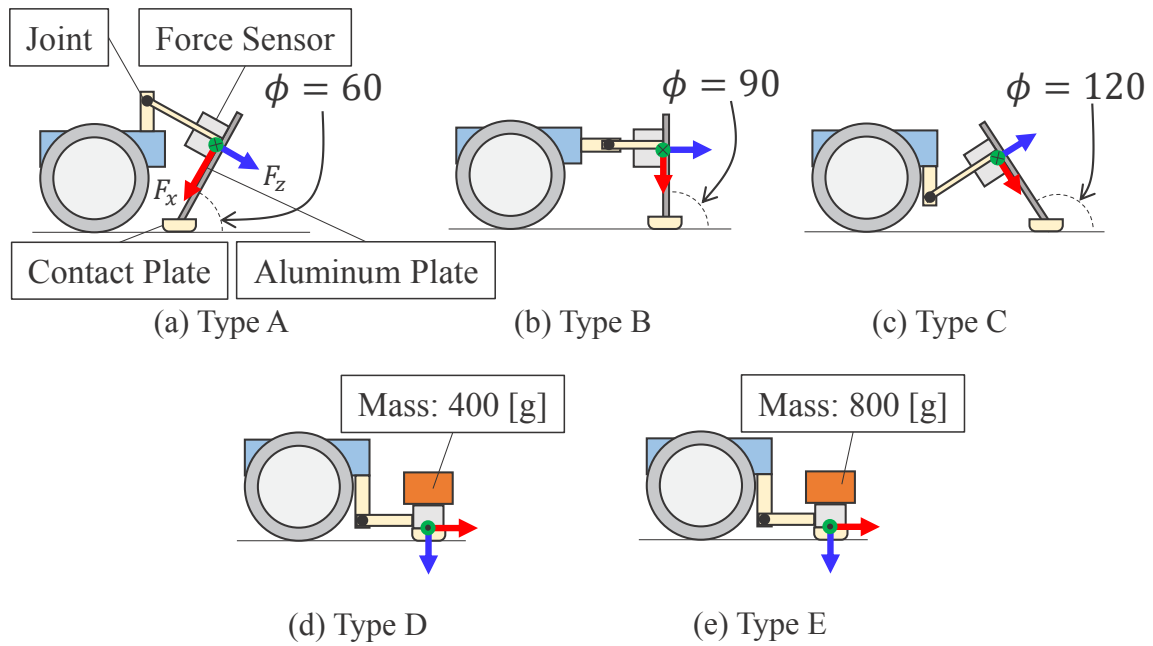


Fig. 4.1: Five Type of Wiping Device Configuration.

Type A, B, C では、センサと接触板が薄いアルミ板を介して接続される。払い動作によって接触板に抵抗力がかかると、アルミ板がたわみセンサに力が伝わる仕組みである。これらの形状では、地面に対するアルミ板の傾斜角、回転軸の位置によって計測される抵抗力の値が異なると考えられる。回転軸を中心とした回転円と、計測対象表面の交点における接線方向の力によって、地面に加える力が異なるため、計測される抵抗力が異なると考えられる。また、Type A, B, C が払い動作時に床面に加える力（アルミ板を伝わって地面に加わる力）は $C < B < A$ の順に大きくなると考えられる。

Type D 及び Type E は力センサ表面に直接接触板を接続している。これらの形状は Fig. 3.4 に示す概要図を再現した形となっている。センサと接触板を直接接続する事で、接触板にかかる力を直接センサで計測できるが、接触板にかかる力の大きさが微小だと正確に計測できない可能性がある。そこで、これらの2種類の構成にはセンサ上面におもりを搭載している。Type D, E の構成は、Type A~C と比較すると、単純な構成となっており、装置構成要素の破損や変形の可能性が低いという利点がある。

4.3 払い装置形状選定実験

4.3.1 実験環境と実験装置

4.2 で挙げた 5 種類の払い装置から適した装置形状を選択する実験を行った。本実験では、Fig. 4.2 に示す 4 種類の板材表面に対して払い動作を適用し、計測された抵抗力の結果から適した形状を選択する。板材の内訳は、PVC シート (PVC)、リノリウム (Linoleum)、アクリル板 (Acrylic)、ステンレス板 (Stainless) の 4 種類である。これらの板材は、人間の生活空間に用いられる床材や壁材などを基準に選定したものである。Table 4.1 には、各板材の硬さと粗さの計測値を示す。物体の硬さは物理量ではなく、計測方法によって値が変わるため、硬さ計測の標準的な方法や計測方法間の比較は困難である。本研究では、JIS K5600-5-4 に定義される、ひっかき硬さ試験 (鉛筆式) [52] と ISO 4586-2 に定義される、ひっかき硬さ試験 (スプリング式) [53] で計測された値を用いた。これらの硬さ計測方法は、主に塗膜の接着具合を計測する方法や、ガラス製品の傷つきやすさを図る指標として用いられている。鉛筆式は、計測対象に鉛筆を斜めに押し付けながら $7\sim 10\text{ mm/s}$ で動かし、傷の出来具合を観察する。スプリング式は、ペンが鉛筆ではなくダイヤモンドチップが先端についたケガキ棒のようなもので、バネで荷重を調整できるという点が鉛筆式と異なるが、計測方法は鉛筆式と同じである。この計測方法は払い動作と類似していることから、本計測方法を採用した。また、表面粗さは Taylor Hobson 製のサートロニック S-100[54] で計測された算術平均粗さを表に示す。

Table 4.1: Surface Materials

Name	Pencil Hardness (h_p)	Spring Hardness (h_s) [MPa]	Surface Roughness (R_a) [μm]
PVC	5B	0.51	4.86
Linoleum	2B	1.20	1.79
Acrylic	4H	5.09	1.57
Stainless	over 6H	4.46	1.67



(a) PVC



(b) Linoleum



(c) Acrylic

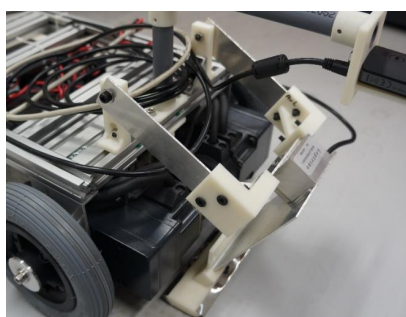


(d) Stainless

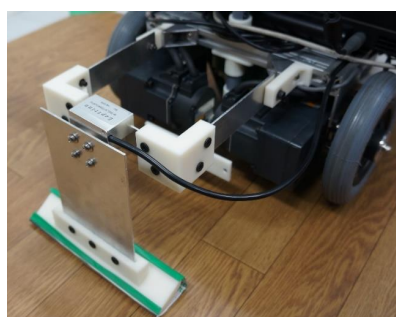
Fig. 4.2: Surface Materials.



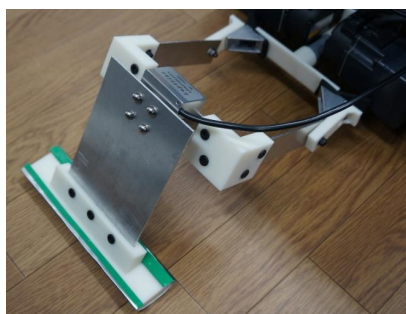
Fig. 4.3: Wheel Type Mobile Robot



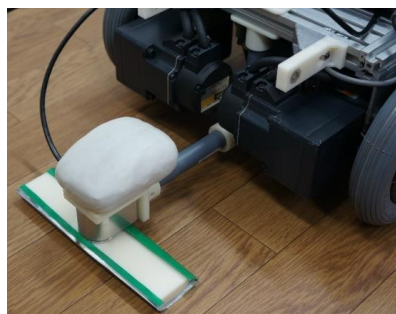
(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C



(d) Type D/E

Fig. 4.4: Five Type of Real Wiping Device.

Fig. 4.3 に示す車輪型移動ロボットプラットフォーム *i-Cart mini*[55] は、払い装置を取り付けて実際に払い動作を行ったロボットである。Fig. 4.4 に、4.2 で述べた 5 形状の払い装置を実際に作成したものを示す。払い装置は *i-Cart mini* の前縁部に取り付けられ、ロボットを前進後退させる事で払い動作による計測を行った。払い速度 v_w は、 0.1 m/s から 0.7 m/s まで 0.1 m/s 刻みで変化させた。また、払い装置に用いた力/トルクセンサは Leprino 社製の *CFS034*[56] を用いた。本センサの定格値は、 X, Y 軸方向 150 N 、 Z 軸方向 300 N となっている。

4.3.2 計測信号の処理方法と抵抗力の代表値

払い動作で計測された抵抗力 f_r の信号処理方法について述べる．Fig. 4.5(a) に払い動作で計測される抵抗力 f_r の例を示す．この信号は，Fig. 4.4(d) に示される Type E の計測装置を用いて計測された．この図から，前進後退方向による払い動作で得られる f_r はセンサ x, z 軸方向に顕著な力を発生させることがわかる．更に，各 v_w ごとの時系列結果を観察すると，センサ各軸方向にかかる力は一定値ではなく大きく変動することがわかる．

払い動作で計測される抵抗力ベクトル \mathbf{f}_r は，センサ各軸方向にかかる荷重 sf_x, sf_y, sf_z を成分に持つベクトルとして $\mathbf{f}_r = [sf_x \ sf_y \ sf_z]^T$ のように表現される． \mathbf{f}_r の各成分は，式 (3.2)(3.3) に示される $\mathbf{f}_d, \mathbf{f}_n, \mathbf{f}_s$ によって変化する．すなわち，表面と接触したときのセンサ姿勢と，払う方向によって変化するといえる．表面性状計測や表面性状推定では，表面性状ごとに抵抗力ベクトルを比較する必要があるが，各成分の大きさがセンサ姿勢によって変化すると考えられることから，各成分同士を独立で比較することが困難である．そのため，本研究では抵抗力ベクトルの大きさを $|\mathbf{f}_r| = f_r$ として比較する． f_r は，以下の式を用いて求める．

$$f_r = |\mathbf{f}_r|, \quad (4.1)$$

$$= |\mathbf{s}\mathbf{f}_x + \mathbf{s}\mathbf{f}_y + \mathbf{s}\mathbf{f}_z|, \quad (4.2)$$

$$= \sqrt{sf_x^2 + sf_y^2 + sf_z^2} \quad (sf_i = |\mathbf{s}\mathbf{f}_i|, i = x, y, z), \quad (4.3)$$

$$\simeq \sqrt{sf_x^2 + sf_z^2} \quad (\because sf_y \simeq 0), \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

また，払い動作を行う際，払う方向を車輪型移動ロボットの前後方向のみとしているため，センサ Y 軸方向にかかる荷重を $f_y = 0$ とした．

Fig. 4.5(b) に，払い動作で計測される f_r の時系列図を示す．この図は，Fig. 4.5(a) で計測された値を式 (4.4) に従い変換した図である．ロボットが前進する際に計測される f_r について観察すると， f_r は同じ払い速度でも変動することがわかる． f_r の時間に対する変動は，性状や形状によって様々に変わるため，時系列信号をそのまま比較することは困難である．そのため， f_r を代表する値を求める必要がある．代表値は，時系列信号の平均値や，最大値と最小値の差，中央値，最頻値などいくつかの方法が考えられる．本研究では， f_r の代表値として中央値を用いた．これは，複数回の計測から実験的に決定したためである．計測信号は，比較的安定しているが，表面の凹凸や通信周期などによってスパイク状のノイズが発生することがある．そのため，平均値や最大最小差分を用いると値が大きく変化してしまい，安定しないことがある．そこで，中央値を f_r の代表値として採用した．

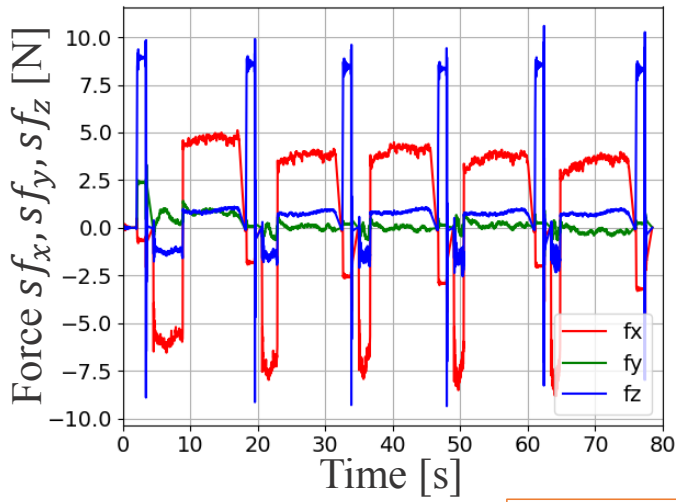
まず，Fig. 4.5(b) に示される計測信号を，目標払い速度ごとに分割する．例えば，(i) は $v_w = 0.1 \text{ m/s}$ の区間であり，(ii) は $v_w = 0.2 \text{ m/s}$ の区間である．各区間において，払い速度が目標の 95%~105% の間に計測された f_r を，「区間抵抗力 ($f_{r(ir)}$)」とする (Fig. 4.5(c) 中の赤線)．ここで，各払い速度 $v_w^{(i)}$ における区間抵抗力を $f_{r(ir)}^{(i)}$ とする．この区間抵抗力 $f_{r(ir)}^{(i)}$ を降順ソートしたときの， j 番目にくる抵抗力を $f_{r(ir)}^{(i,j)}$ とすると，払い速度 $v_w^{(i)}$ にお

る抵抗力の中央値 $mf_r^{(i)}$ は以下の式で求められる.

$$mf_r^{(i)} = \text{median} \left(f_{r(ir)}^{(i)} \right) \quad (4.6)$$

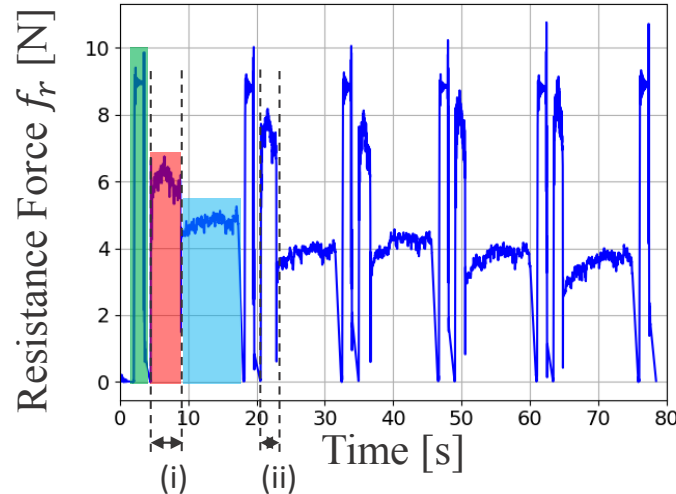
$$= \begin{cases} f_{r(ir)}^{(i, \frac{M_{(ir)}-1}{2}+1)} & (M_{(ir)} = 2m + 1), \\ \frac{1}{2} \left(f_{r(ir)}^{(i, \frac{M_{(ir)}}{2})} + f_{r(ir)}^{(i, \frac{M_{(ir)}}{2}+1)} \right) & (M_{(ir)} = 2m). \end{cases} \quad (4.7)$$

なお, $M_{(ir)}$ は, 払い速度 $v_w^{(i)}$ における区間抵抗力 $f_{r(ir)}^{(i)}$ の総数で, m は1以上の整数とする.



(a)

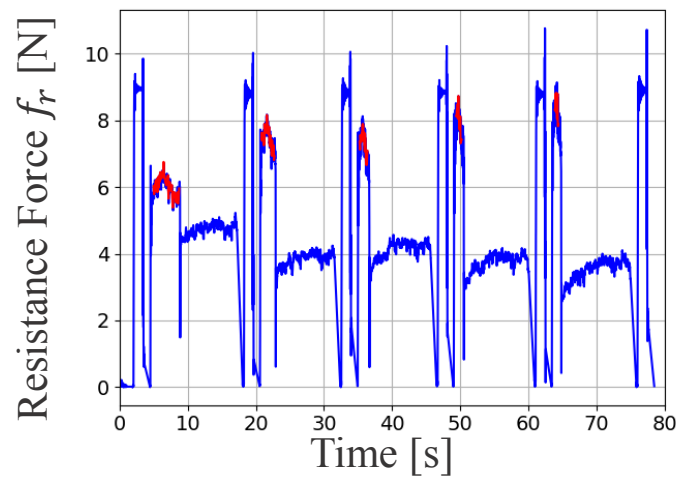
Step 1: Calculate resistance force.



(b)

- Separating-motion
- Wiping-motion (Forward)
- Wiping-motion (Backward)

Step 2: Select in-range signals.



(c)

- In-range resistance force

Fig. 4.5: Measured Signal Processing

4.3.3 実験結果と考察

Fig. 4.6 には、各形状の払い装置で計測した mf_r と v_w の関係を示す。図中の各図は、横軸に払い速度 (v_w)、縦軸に抵抗力の中央値 (mf_r) をとっている。払い動作は Fig. 4.2 に示す各板材に対して 5 回ずつ行った。すなわち、各 $v_w^{(i)}$ ごとに、5 個の $mf_r^{(i)}$ を持つため、図は箱ひげ図 [57] で表現されている。

図からわかる各形状の計測結果を以下に述べる。

Type A: PVC を除く 3 種類の板材は、 v_w 増加に伴って mf_r が増加。PVC は v_w 増加に伴って mf_r が減少。

Type B: 4 種の板材における v_w に対する mf_r の変化傾向は類似。各板材の mf_r 値はすべての v_w において明確に異なる。

Type C: mf_r は v_w に対して増加傾向。PVC を除く 3 種の板材において mf_r の値が類似。

Type D: mf_r の v_w に対する変化傾向はおおよそ一定。PVC における mf_r の分散値が大きい一方で、残る 3 種の板材は分散が小さく、類似した値。

Type E: 板材 4 種共、 mf_r の変化傾向は増加傾向。各板材の mf_r 値はすべての v_w において明確に異なり、分離性が高い。

以上の結果から、乾いた表面に対して払い動作を適用すると、払い速度 v_w に対して mf_r は増加傾向を示しやすいということがわかる。このため、Type A において PVC の mf_r 変化傾向がその他の計測結果における mf_r 変化傾向と異なっていることから、Type A は払い装置に適さない形状であると言える。払い装置は、Type B から E の 4 形状から選定する。

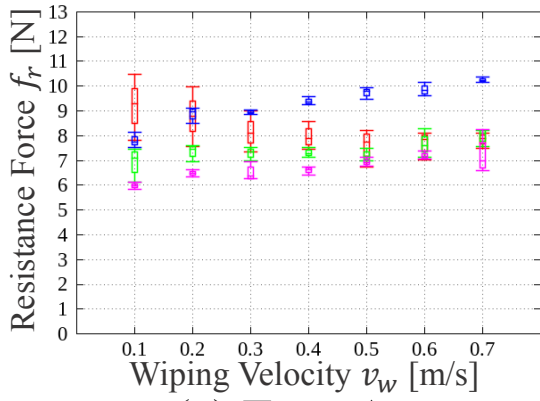
Type B から E の計測結果は、以下の 2 つのグループに大別できる。

(I) 板材間で抵抗力 mf_r が明確に異なる。

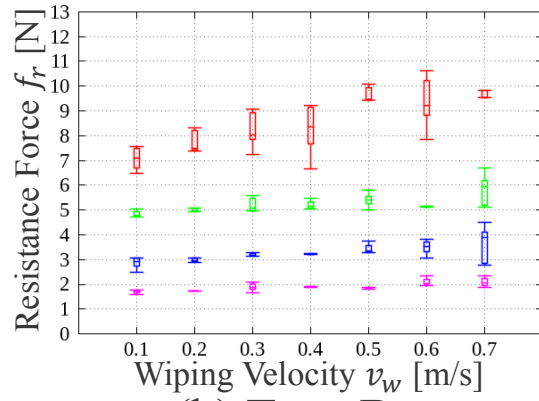
(II) 板材間で抵抗力 mf_r の違いが小さい。

Type B と Type E はグループ (I) に属し、Type C と Type D はグループ (II) に属する。板材間における mf_r の違いは、払い装置が板材表面にかける荷重によるものだと考えられる。払い動作は式 (3.2)、(3.3) によって発生する合力 f_r を計測する動作である。ここで、板材の違いはせん断力の大きさ (f_s) として表現されると考えると、払い動作で得られた mf_r を用いて板材を種別するためには、表面に十分な荷重を加える必要があると考えられる。

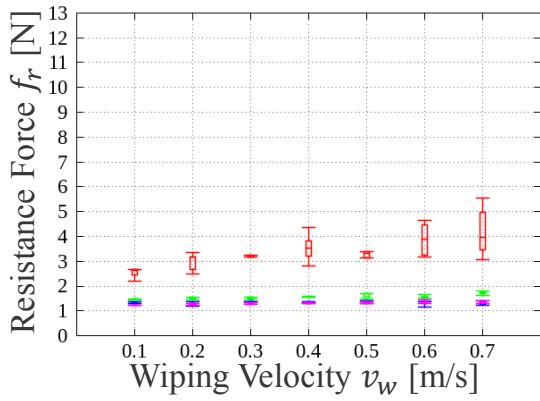
なお、Fig. 4.6(a) に示される通り Type A が表面に加える力は大きいですが、PVC の mf_r 変化傾向が他の板材と異なった理由について考察する。払い装置が表面に加える力は反力となってアルミ板を曲げる力となる。アルミ板は弾性を有するため、曲げる力が加わると元の形に戻ろうとする復元力が発生する。この構造の払い装置は、曲がったアルミ板が復元する力が大きくなると、表面との接触部が跳ね上がってしまう。払い速度 v_w が大きくなると、瞬間的にアルミ板に加わる力は大きくなるため、接触部が板材表面から離れてしまい、その結果 mf_r が小さくなったと考えられる。これらの結果から、払い装置として適した形状はグループ (I) に属する Type B 及び Type E であると考えられる。



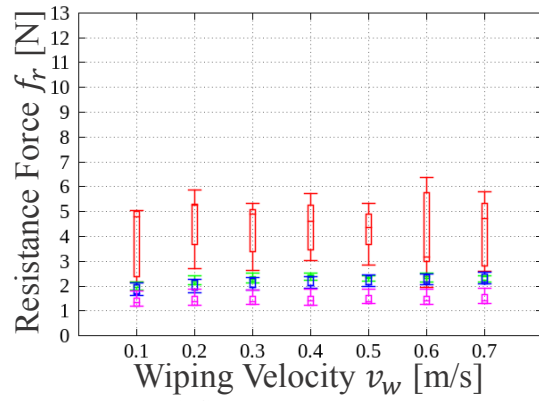
(a) Type A



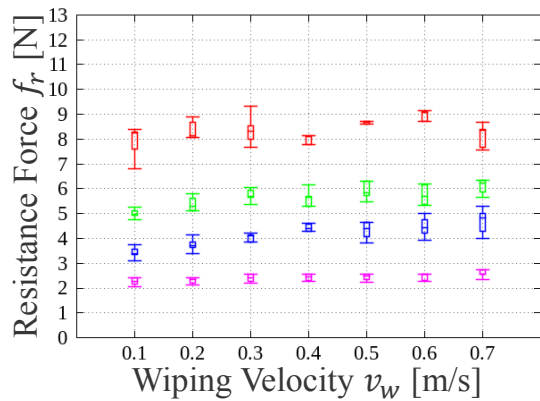
(b) Type B



(c) Type C



(d) Type D



(e) Type E

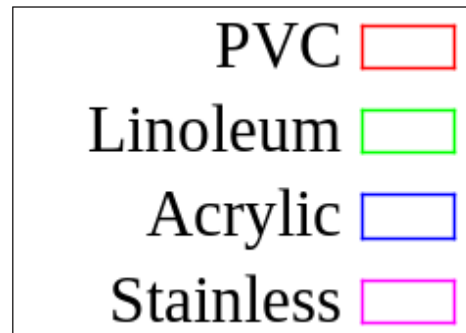


Fig. 4.6: Resistance Force per Each Wiping Velocity

Type B 及び Type E を用いて、液体が塗布された表面に対して払い動作を適用し、計測結果から適した装置形状を選定する実験を行った。ここでは、Table 4.2 に示す 2 種類の粘度の異なる液体をそれぞれ塗布した板材表面に対して払い動作を適用した場合の mf_r の値と v_w に対する変化傾向を比較することで、払い動作に適した装置構成を選定する。

Table 4.2: Surface Condition

Condition Name	Viscosity [mPa·s]
Water	1.0
Salad Oil	52.5

表面状態は、Table 4.2 に示す *Water*, *Salad Oil* に加え、液体を塗布しない乾いた状態を *Clean* とし、合計 3 状態を用意した。Fig. 4.7 に各状態で払い動作を行った計測結果を示す。図中の各図は、横軸に払い速度 v_w 、縦軸に抵抗力 mf_r の中央値をとっており、表面材質と表面状態を組み合わせた各表面性状ごとに 5 回ずつ計測を行った結果を箱ひげ図で示した。

Clean 状態を除いた、Water と Salad Oil の結果を以下にまとめる。

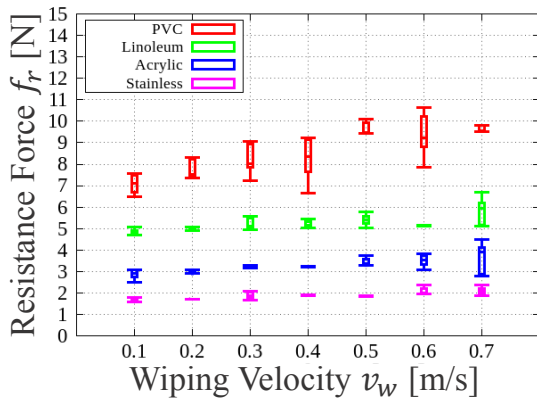
Type B Water: mf_r の値はどの表面材質及びどの払い速度 v_w においても小さい。 mf_r の v_w に対する変化傾向は微小ながら増加傾向が見られる。

Type B Salad Oil: mf_r の値はどの表面材質及びどの払い速度 v_w においても小さい。 mf_r の v_w に対する変化傾向は微小ながら増加傾向が見られる。

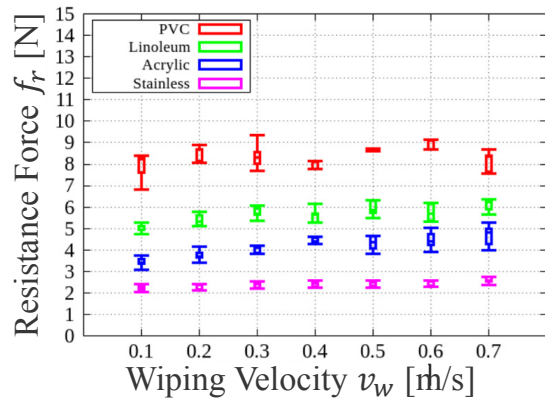
Type E Water: 表面材質ごとに mf_r の値が異なる。 v_w に対する mf_r の変化傾向は PVC を除いて v_w 増加に伴って減少する傾向が見られる。

Type E Salad Oil: PVC を除いた 3 種の板材の mf_r 値は類似。 v_w に対する mf_r の変化傾向は v_w 増加に伴って mf_r が増加。

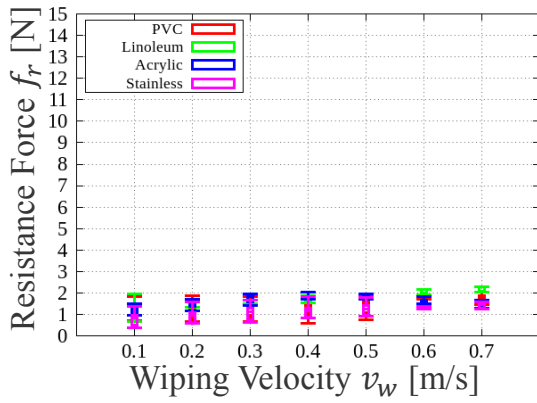
以上の結果より、すべての表面状態において表面材質ごとに異なる mf_r を計測できる、Type E が払い装置として適していると考えられる。



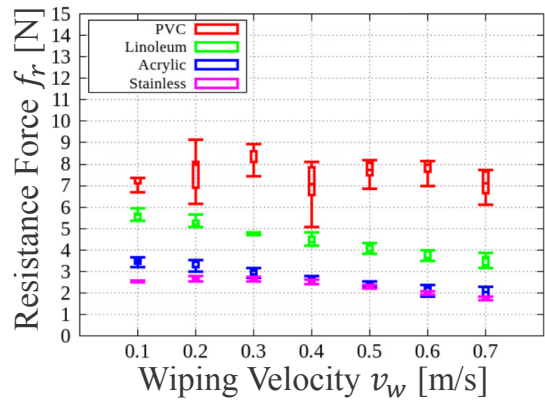
(a) Type B Clean



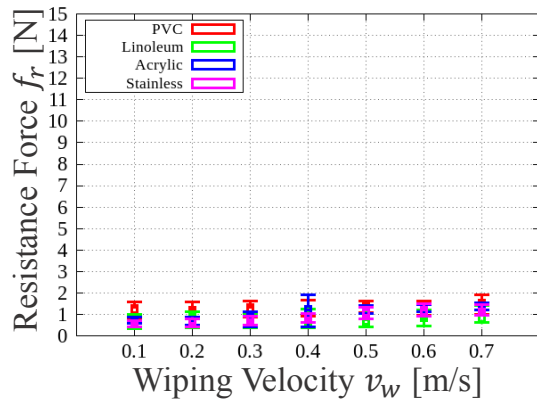
(d) Type E Clean



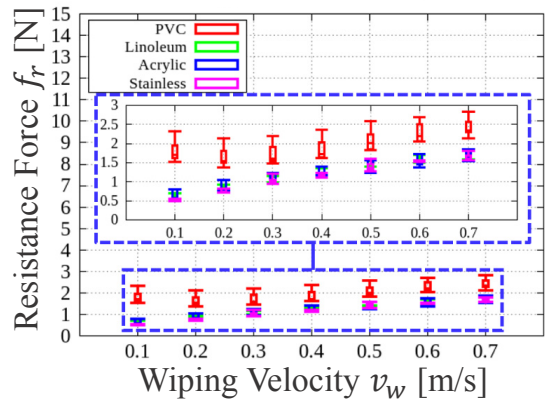
(b) Type B Water



(e) Type E Water



(c) Type B Salad Oil



(f) Type E Salad Oil

Fig. 4.7: Resistance Force per Each Wiping Velocity.

Type E の払い装置を用いて計測された抵抗力 mf_r について考察する。Fig. 4.7(d), (e), (f) より, mf_r は表面材質と表面状態によって異なることがわかる。主に, 材質の違いは mf_r の大きさとして表現され, 状態の違いは v_w に対する mf_r の変化傾向として表現されることがわかる。表面状態の違いによる v_w に対する mf_r の変化傾向について下記する。

Clean: 払い速度 v_w 増加に伴って抵抗力 mf_r が増加する傾向。

Water: v_w 増加に伴って mf_r は減少する傾向。

Salad Oil: v_w 増加に伴って mf_r が増加する傾向。

抵抗力 mf_r と Table 4.1 に示されたひっかき硬さを比較した結果を Fig. 4.8 に示す。この図は, 横軸に鉛筆引っかき硬さ, 縦軸に抵抗力値をとった図である。横軸の値が大きくなる, すなわち表面硬さが大きくなると mf_r の値が小さくなる傾向が見られる。この傾向は, 表面状態によらず概ね共通していることから, mf_r の大きさと表面材質の硬さには相関があると考えられる。

以上の結果から, 次のことが言える。表面性状ごとに異なる抵抗力 mf_r を計測できる, 払い動作に適した形状の計測装置は Type E の形状である。Type E によって計測された mf_r は, 表面性状ごとにその大きさと v_w に対する変化傾向が異なる。すなわち, 払い動作は表面性状計測に有効に働く事が示された。更に, mf_r の v_w に対する変化傾向は表面に塗布された液体の性質を表現し, mf_r の大きさは表面材質の硬さを表現している事がわかった。

払い動作の課題として, 払い速度 v_w が大きい事が挙げられる。本章で実施した実験では, 払い速度を 0.1 m/s から 0.7 m/s とした。第 1 章の 1.3 で述べた通り, 払い動作は文献 [32] のように, ロボットのマニピュレータなどに計測装置を付けて行うことを想定している。払い動作を行う Type E の払い装置は 800 g のおもりを搭載しているため, 総重量が約 1 kg となっており, マニピュレータで扱うには少々重いと考えられる。そのため, マニピュレータを用いて本研究で設定した v_w で払い動作を行うには, 多少困難さが残ると考えられる。この課題を解決するには, v_w を現在の 10% ほどにし, 低速度で払い動作を行う方法や, 払い装置の小型軽量化が考えられる。

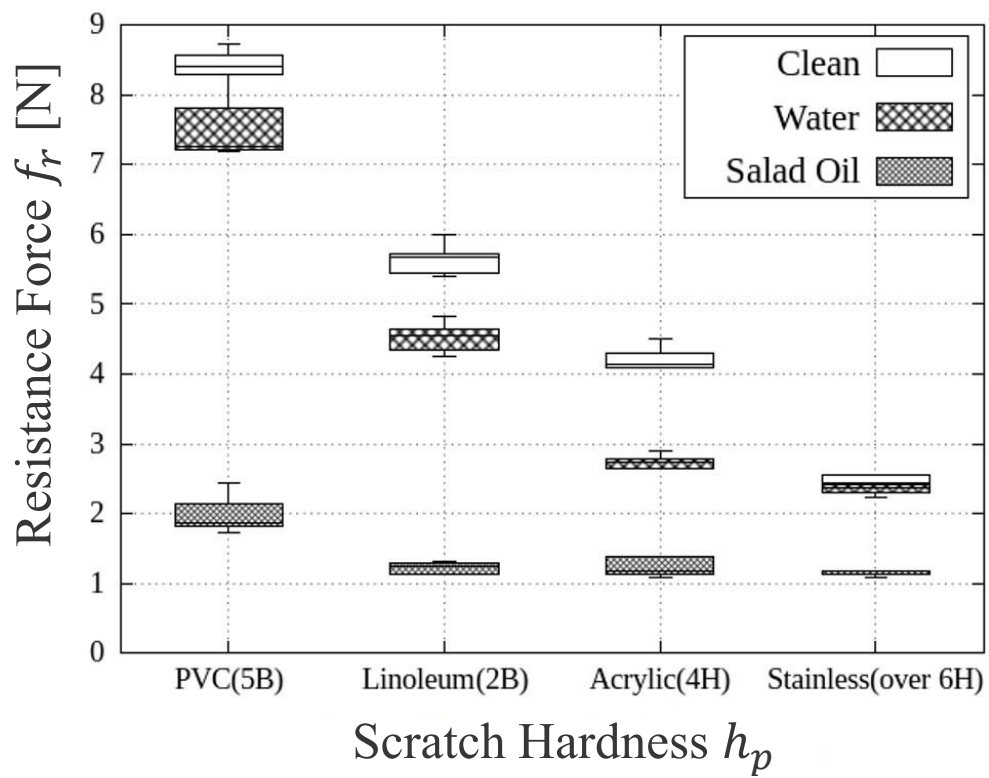


Fig. 4.8: Comparison of Resistance Force and Scratch Hardness.

4.4 離し動作による表面状態の計測実験

4.4.1 実験環境と実験装置

離し動作を用いて表面状態の計測実験を行った。ここでは、粘度の異なる液体を複数の板材表面に塗布し、離し動作によって接着力 f_{ad} 及び接着粘度 η_{ad} を計測する。計測された f_{ad} と η_{ad} を液体粘度 η と比較し、計測値が η と同一の傾向を持つことを示し、離し動作の有効性を検証する。

実験に用いた板材は Fig. 4.2 に示した板材を用いた。また、用意する表面状態を Table 4.3 に示す。Table 4.3 の Clean の粘度は、空気の粘度を記した。

Table 4.3: Condition List

Name	Viscosity (η) [mPa·s]
Clean	1.82×10^{-2}
Water	1.0
Machine Oil	14.4
Salad Oil	52.5

実験に用いた装置を取り付けたロボットを Fig. 4.9 に示す。ロボットは、Fig. 4.3 に示した車輪型移動ロボットを用いた。Fig. 4.9(a) は、離し動作実行前の計測装置で、(b) は離し動作実行後の計測装置を示している。剥がし装置は Fig. 3.7 に示す要素で構成されている。センサ持ち上げ用のモータは Robotis 社の *Dynamixel AX-18A* を使用した。また、アームは ABS 樹脂でできている。板材に液体を塗布する領域は、ロボットの左右輪間隔より狭く、接触板のみが接触する範囲に塗布した。

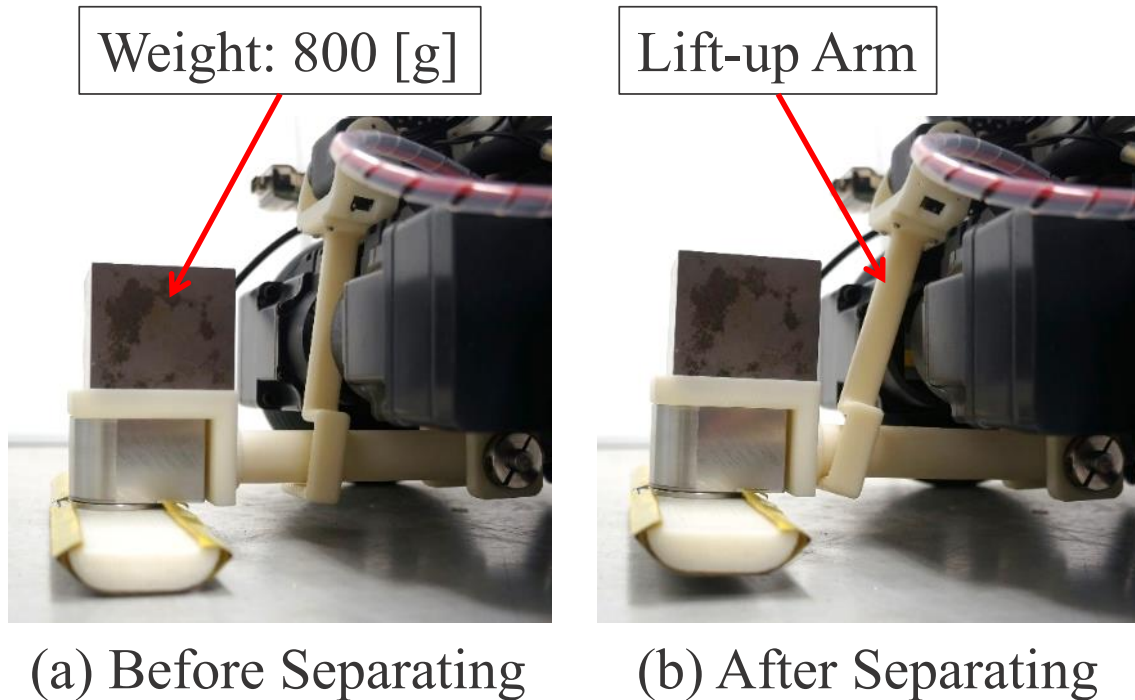


Fig. 4.9: Measurement Apparatus.

4.4.2 実験結果と考察

Fig. 4.10 には離し動作で計測された4種類の表面状態の抵抗力 f_r の時系列図を示す。この図は表面材質を Acrylic としたときに得られた図である。着目すべきは、各図中の赤点線で囲った部分である。この部分は離し動作によって計測される粘性抵抗 f_v の最大値、すなわち接着力 f_{ad} を示している。同じ表面材質の場合、表面状態によって f_{ad} の値が異なっていることがわかる。

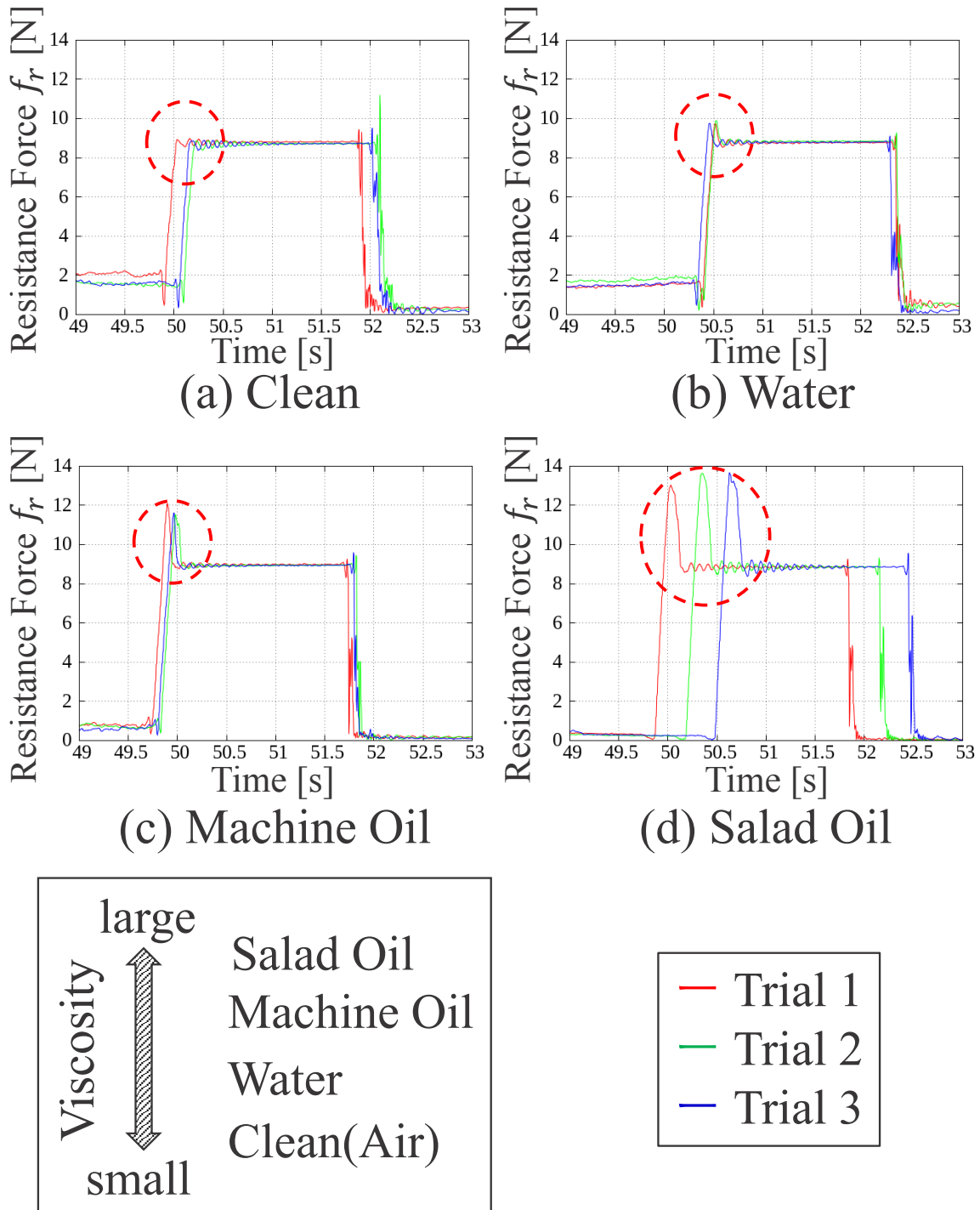


Fig. 4.10: Time-Series Graph of Resistance Force (f_r) while Separating Motion on Acrylic.

Fig. 4.11 に、離し動作で得られた f_{ad} と η_{ad} の計測結果を示す。各表面状態ごとの計測結果を以下に述べる。

Clean: 計測結果分布位置が他の状態と重畳しない。 f_{ad} , η_{ad} ともに分散が小さい。

Water: Clean と同様に分布位置の重畳が少ない。 f_{ad} , η_{ad} ともに分散が小さい。

Machine Oil: Salad Oil の分布位置と重畳する点が複数存在。分布中心は $(f_{ad}, \eta_{ad})=(12, 300)$ 付近だが、 f_{ad} , η_{ad} ともに低い値に計測点が点在。

Salad Oil: Machine Oil と類似傾向。分布中心は $(f_{ad}, \eta_{ad})=(13, 350)$ 付近だが、 f_{ad} , η_{ad} ともに低い値に計測点が点在。

この結果から、Oil 系の液体は概ね類似した値を取るが、計測値の誤差が大きいことがわかる。

f_{ad} と η_{ad} をそれぞれ Table 4.3 に示す液体粘度 η と比較した結果について下記する。 f_{ad} と η を比較すると、 η が大きいほど、 f_{ad} も大きくなる傾向が確認できる。一方で、 η_{ad} と η を比較すると、 Clean と Water の値が η では $Clean < Water$ であるのに対して、 η_{ad} の値は $Water < Clean$ となっている。このことから、 f_{ad} は η と同一の傾向を示すため、離し動作では f_{ad} を計測することで、表面状態に関する情報を取得できる事がわかる。

以上の結果から、表面状態を計測する場合、離し動作が有効に働く事が示された。しかし、離し動作には改善すべき課題が残っている。本章で行った実験では、液体を堆積物として用いた。しかし、堆積物がホコリや砂などの粉体の場合、液体ほど強い粘性を有していないため、単純な離し動作では接着力を測定出来ない可能性がある。更に、例えば油で劣化した天然ゴムのように、表面そのものが粘着質な場合、高粘度の液体が塗布された場合と同じ接着力を計測してしまう可能性が考えられる。これらの課題を解決するには、視覚情報との連携や、様々な方向に対して離し動作を行う（例えば、斜め前方に向かって計測装置を持ち上げる）などの方法が考えられる。

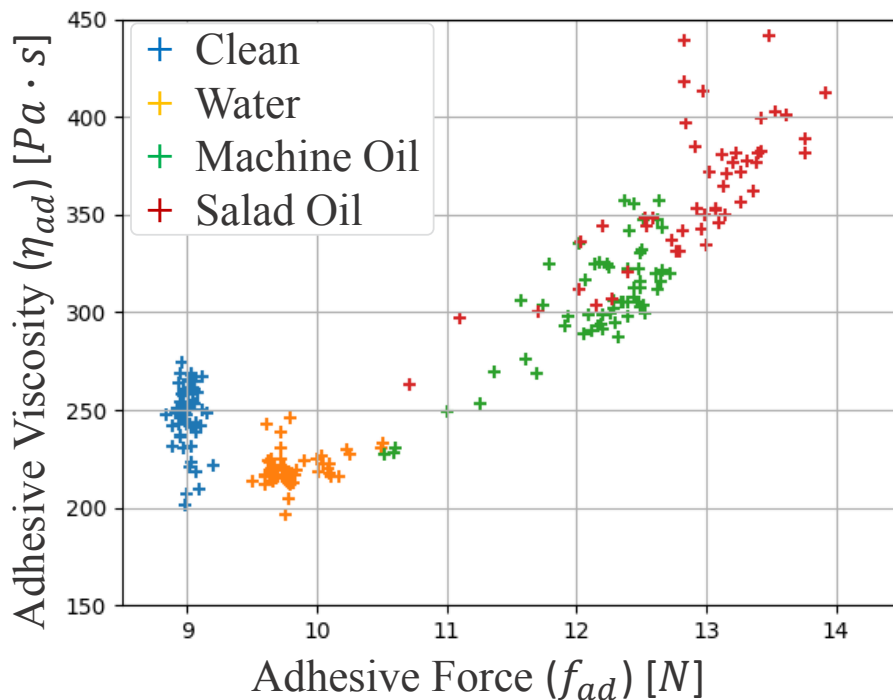


Fig. 4.11: Measurement Result of f_{ad} and η_{ad} .

4.5 まとめと今後の展望

本章では、第3章で提案した表面性状計測動作の有効性検証実験について述べた。払い動作と離し動作を実現するために、6軸力覚センサ、接触板、接触板カバー、自由回転軸、持ち上げ機構で構成される装置を作成した。作成される計測装置は、払い動作と離し動作によって表面性状ごとに異なる抵抗力 f_r を計測できる必要がある。この条件を満たすため、装置構成要素の配置を変えた計測装置を5種類作成し、実際に払い動作を行うことで実験的に適切な装置形状を選択した。

装置形状選定実験では、PCV, Linoleum, Acrylic, Stainless の4種類の乾いた表面材質に対して、5種類の払い装置で払い動作を行った。表面状態が同じ場合は払い速度 v_w に対する mf_r の変化傾向が類似する事を前提とし、表面材質ごとに明確に異なる mf_r を計測できる形状を2種類選択した。

更に、選択された2種類の装置を用いて、液体が塗布された表面に対して払い動作を適用する実験を行った。そこでは水とサラダ油を用意し、形状選定実験で用いた材質表面に塗布し、払い動作で mf_r を計測した。実験結果から、液体が塗布された状態においても表面材質ごとに異なる mf_r を計測できる装置として Type E を選定した。

離し動作の有効性検証実験では、表面状態ごとに異なる接着力 f_{ad} を計測する実験を行った。装置は装置形状選定実験で選定された Type E の払い装置を改造し、アームとモータからなる簡便な上下動機構を追加した。実験には上記の4種類の材質と、Clean, Water, Machine Oil, Salad Oil の4つの状態を用いた。実験結果から、 f_{ad} が表面状態ごとに異なり、同一表面状態では近い値を持つ事がわかり、離し動作の有効性が示された。また、接着力 f_{ad} は液体粘度 η と類似した傾向を持ち、 η が大きい表面状態では f_{ad} も大きくなる事がわかった。

以上の結果より、提案手法の払い動作と離し動作は表面性状計測において有効に働く事がわかった。更に、提案動作を実現する計測装置は簡便な構造で実現できる事が示された。今後の課題を以下に列挙し、本章を締めくくる。

- 低払い速度における払い動作の適用と有効性検証
- 払い装置小型軽量化
- 視覚情報との連携
- 多方向への離し動作の適用

第5章 表面性状を記述する特徴量

5.1 はじめに

本章では、表面性状を表現する（記述する）ための特徴量（記述特徴量）について述べる。第4章では、表面性状ごとに抵抗力の中央値 mf_r や、払い速度 v_w に対する mf_r の変化傾向、接着力 f_{ad} が異なる事を述べた。そこで、これらの値を用いた表面性状記述特徴量を作成し、定量評価指標として提案する。

5.2 単純な記述特徴量

本節では、表面性状を記述する最も単純な特徴量について述べる。Fig. 4.6 に示されるように、 f_r の中央値 (mf_r) は目標払い速度 v_w ごとに異なる。また、 v_w に対する mf_r の変化傾向は、表面性状ごとに異なる値を持つ傾向がわかる。このことから、 v_w と mf_r をセットにし、その集合を特徴量とする方法が考えられる。

$$\mathbf{x}_{sl} = \begin{bmatrix} v_w^{(1)} & mf_r^{(1)} \\ v_w^{(2)} & mf_r^{(2)} \\ \vdots & \vdots \\ v_w^{(N)} & mf_r^{(N)} \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

なお、 $v_w^{(i)}$ はある払い速度を意味し、 $mf_r^{(i)}$ はその払い速度区間における抵抗力の中央値を意味する。また、 N は払い速度の種類数を意味する。

この特徴量は、 $v_w^{(i)}$ と N が一定の場合、 $v_w^{(i)}$ 列を省略して次の式のように単純な表記ができる。

$$\mathbf{x}_{sl}^{short} = \begin{bmatrix} mf_r^{(1)} \\ mf_r^{(2)} \\ \vdots \\ mf_r^{(N)} \end{bmatrix}. \quad (5.2)$$

本研究では、 mf_r を「単純羅列 (simple list)」した特徴量という意味から、 sl 特徴量と呼ぶ。

sl 特徴量は、 mf_r を単純に羅列するだけで良いという利点があるが、 N の数が変わったり、 $v_w^{(i)}$ の値が変わると、次元が変化してしまう。そのため、異なる条件で計測された計測値同士を比較する際に、工夫が必要となるという課題がある。

5.3 mf_r を利用した記述特徴量

5.3.1 mf_r とパラメータの相関関係調査

第4章4.3の実験結果で、Type Eの払い装置を用いて計測した抵抗力中央値 mf_r の値や v_w に対する変化傾向は、表面性状ごとに異なる事を述べた。改めて、その特徴を以下に述べる。

mf_r の値: 表面材質が柔らかいほど大きい。(Fig. 4.8)

mf_r の傾向: 表面状態ごとに v_w に対する変化傾向が異なる。Clean は増加傾向、Water は減少傾向、Salad Oil は増加傾向。(Fig. 4.7(d), (e), (f))

これらの特徴より、 v_w ごとに計測した mf_r は表面材質と表面状態を表現する潜在力を有すると考えられる。すなわち、払い動作で計測された mf_r とその時の払い速度 v_w を用いることで、表面材質と表面状態を表現する特徴量を作れると考えられる。

表面性状を表す特徴量を作成するにあたり、抵抗力中央値 (mf_r) が払い速度 (v_w)、ひっかき硬さ (h_s)、液体粘度 (η) とどれほど相関を持つか調査する必要がある。相関が大きいほど、その情報をよく表現できると考えられる。

相関関係を求めるため、次式で表される相関係数行列 CR を用いる。

$$CR = \begin{bmatrix} cr_{11} & cr_{12} & \cdots & cr_{1J} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ cr_{J1} & cr_{J2} & \cdots & cr_{JJ} \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

$$cr_{ij} = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (5.4)$$

ここで、 x_i や y_i はそれぞれ相関関係を求めたい系列のデータ列である。例えば、払い速度 v_w と抵抗力 mf_r の相関関係を求めるとすると、 $x_i = v_w^{(i)}$ 、 $y_i = mf_r^{(i)}$ となる。 cr_{ij} は相関係数と呼び、 $-1 \leq cr_{ij} \leq 1$ の値を持つ。また、系列同士の相関関係が強いほど、 cr_{ij} は-1や1に近い値を持ち、相関関係が低いほど0に近い値を持つ。

Fig. 5.1 に表面材質ごとにデータを区切った場合の相関係数行列 CR の結果を、Fig. 5.2 に表面状態ごとにデータを区切った場合の相関係数行列 CR の結果をそれぞれ示す。この図は、 CR の要素 cr_{ij} を色で表現しており、-1に近いほど青色になり1に近いほど赤色になっている。更に、Fig. 5.1は、計測された全ての mf_r データを表面材質ごとに分割し、分割されたデータ内における相関係数行列を求めた結果である。また、Fig. 5.2も同様に、全ての mf_r データを表面状態ごとに分割し、分割されたデータ内における相関係数行列を求めた。各図の mf_r の行に着目すると、Fig. 5.1では η と、Fig. 5.2では h_s と相関を持つことがわかる。このことから、 mf_r が硬さと液体粘性に関する情報を比較的多く有していると考えられる。よって、表面性状を表現する特徴量を作成するにあたり、単純な四則演算を用いて特徴量を作成しても表面材質及び表面状態を表現する情報は失われにくいと考えられる。

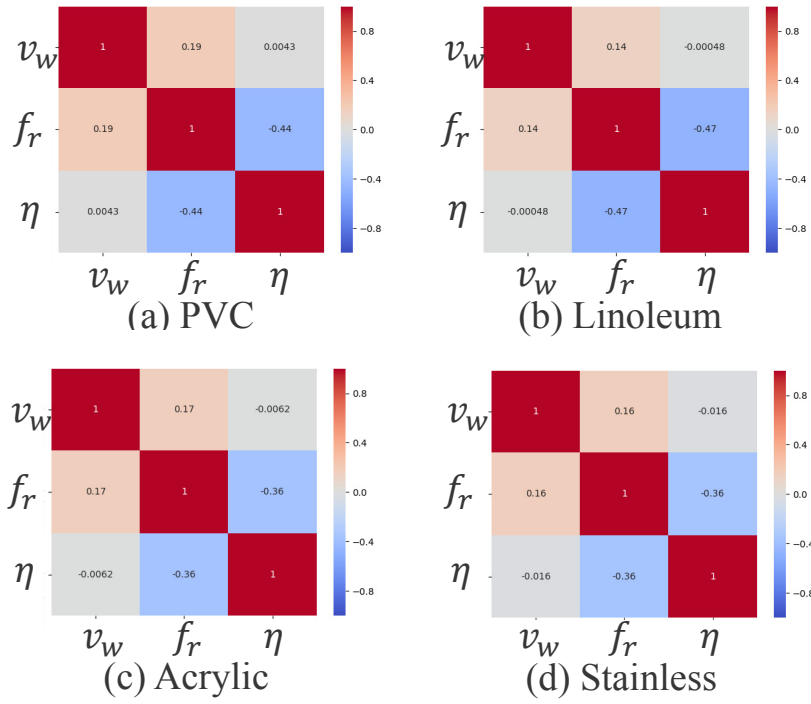


Fig. 5.1: Coefficient of Correlation in Each Surface Material.

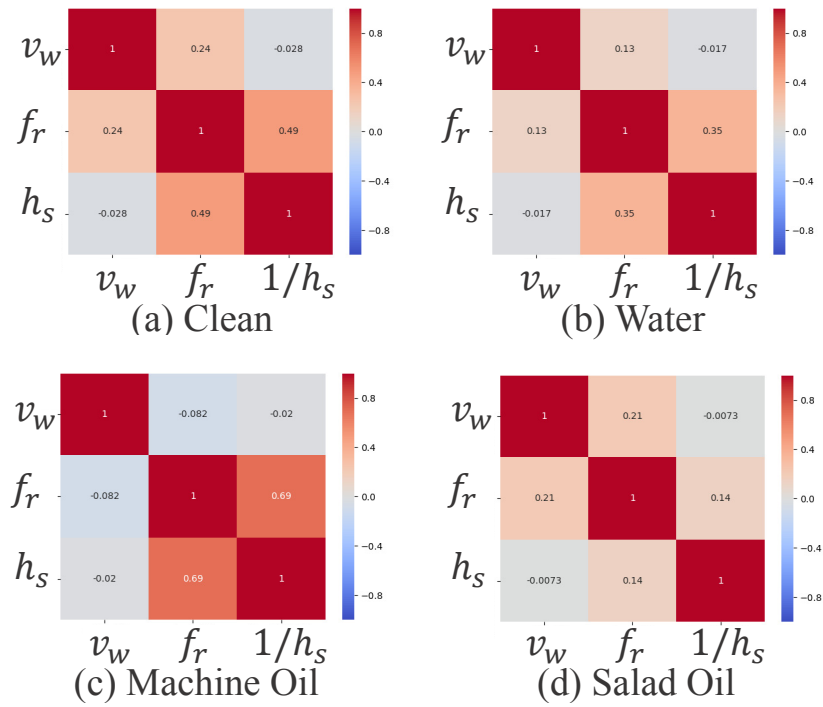


Fig. 5.2: Coefficient of Correlation in Each Surface Condition.

5.3.2 vr 特徴量

表面性状を表現する特徴量を，本研究では表面性状記述特徴量 (*descriptive feature*) と呼ぶ．先程求めた相関係数行列の結果から，表面性状記述特徴量は単純な四則演算で求められると考えられる．そこで，特徴量として“平均抵抗力値 R_{avg} ”と“平均変化傾向値 V_{avg} ”を提案し，以下の式で定義する．

$$R_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m f_r^{(i)}, \quad (5.5)$$

$$V_{avg} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (m f_r^{(i+1)} - m f_r^{(i)}). \quad (5.6)$$

$m f_r^{(i)}$ は $v_w = v_w^{(i)}$ における抵抗力中央値を意味し， N は目標払い速度 v_w の個数である．例えば， $v_w = 0.1, 0.2, 0.3$ の場合， $N = 3$ となる．

R_{avg} は，各払い速度における抵抗力の平均値であり，これは表面の硬さを表現している．また， V_{avg} は，払い速度間における抵抗力の増分の平均値であり，この値は表面の滑りやすさを表現している．これらの値を用いて表面性状を記述する特徴量として次の記述方法が考えられる．

$$\mathbf{x}_{vr} = \begin{bmatrix} V_{avg} \\ R_{avg} \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

本研究では，この記述特徴量を vr 特徴量と呼称する．

これらの提案特徴量を用いて，Fig. 4.7(d), (e), (f) で計測された値を Fig. 5.3(a), (b), (c) に示す．この図では横軸を V_{avg} ，縦軸を R_{avg} としてプロットした．各図はそれぞれ (a) Clean, (b) Water, (c) Salad Oil の特徴点を示している．特徴点分布は次の傾向を有している．

Clean: $V_{avg} > 0$ に特徴点が分布． R_{avg} は *Stainless* < *Acrylic* < *Linoleum* < *PVC* の順に大きくなる．

Water: $V_{avg} < 0$ に特徴点が分布． R_{avg} は *Stainless* < *Acrylic* < *Linoleum* < *PVC* の順に大きくなる．

Salad Oil: $V_{avg} > 0$ に特徴点が分布． R_{avg} は PVC 以外はほとんど同じ値に分布．

$V_{avg} = 0$ 付近の PVC は Clean と Water の傾向に当てはまらない特徴点も存在するが，概ね上記の傾向を持つと言える．この傾向は，Fig. 4.7(d), (e), (f) の計測結果の特徴を表現できていると考えられる．

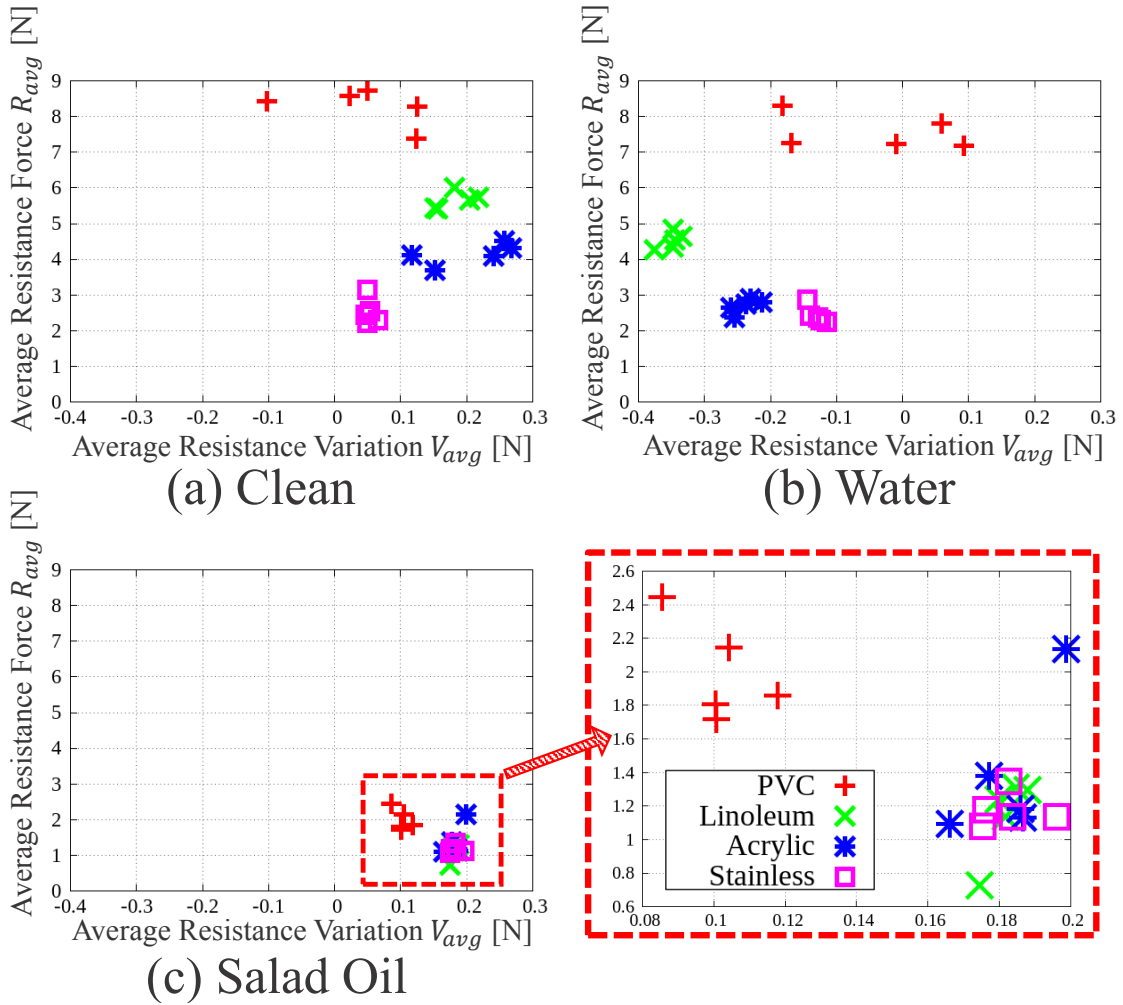


Fig. 5.3: Distribution of vr Feature Points.

5.3.3 vr 特徴量の問題点と解決方法

vr 特徴量を同一特徴空間にプロットした図を Fig. 5.4 に示す。この図には、表面性状が異なるにもかかわらず近い位置に分布する特徴点が存在する。そのような点を Fig. 5.4(a), (b), (c) に示した。(a) のケースは、PVC-Clean と PVC-Water の点であり、液体の有無を判別できない可能性がある。ケース (b) は、Stainless-Clean と PVC-Salad Oil の特徴点であり、これらは抵抗力 mf_r が小さいという共通点がある。しかしながら、抵抗力の低さが表面材質の性質に起因するものか、表面状態の性質に起因するものか判別をつけるのが困難であるといえる。更に、ケース (c) は、同一表面状態の特徴点であるが、特徴点分布位置が重畳しており表面材質を分類する事が困難であるといえる。すなわち、 vr 特徴量は表面性状推定に用いる事を考えると、記述特徴量として不十分であると考えられる。

(a) と (b) は、異なる表面性状を対象として、(c) は異なる表面材質を対象としている。特に、(a) と (b) は表面性状計測という観点から解決されるべき問題である。

提案特徴量を用いて求めた特徴点は、払い動作で得られた mf_r を用いて求めている。すなわち、表面状態のみに依存した特徴量を用いることで、(a)(b) のような問題を解決できると考えられる。言い換えると、払い動作と独立している離し動作によって計測された特徴量を用いることが問題解決につながると考えられる。

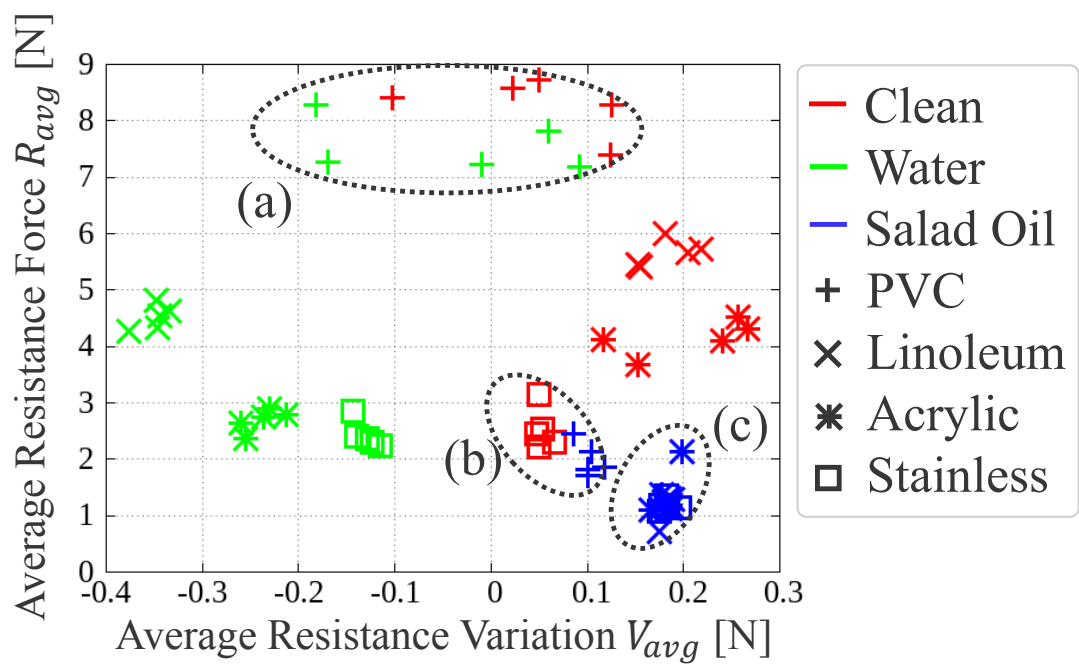


Fig. 5.4: vr Feature Point in Same Feature Vector Space.

5.4 f_{ad} を用いた記述特徴量

5.4.1 $vr f$ 特徴量

第4章4.4で、離し動作を用いて計測された f_{ad} と η_{ad} を液体粘度 η と比較した。ここでは、 f_{ad} は η と類似した傾向を持ち、液体粘度が高くなると f_{ad} も大きくなる事を述べた。この結果から、表面状態のみに依存する特徴量として f_{ad} を利用して表面性状を記述する。

f_{ad} を用いた特徴量記述には、 vr 特徴量ベクトルに新たな次元として f_{ad} を加える。 f_{ad} は Fig. 4.11 に示される分布図の通り、計測される値が幅を持つ。複数回計測された接着力 f_{ad} の集合を S_{ad} とする。 S_{ad} の全要素 $f_{ad}^{(i)}$ を降順にソートしたときの中央値を mf_{ad} とし、接着力 f_{ad} の代表値とする。

$$S_{ad} = \left\{ f_{ad}^{(1)}, f_{ad}^{(2)}, \dots, f_{ad}^{(M_{(ad)})} \right\}, \quad (5.8)$$

$$mf_{ad} = \text{median}(S_{ad}). \quad (5.9)$$

以上より求めた mf_{ad} と vr 特徴量を組み合わせて、次の特徴量を作成する。

$$\mathbf{x}_{vr f} = \begin{bmatrix} V_{avg} \\ R_{avg} \\ mf_{ad} \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

この特徴量を $vr f$ 特徴量とする。

5.4.2 可視化と vr 特徴量との比較

Fig. 5.5 に $vr f$ 特徴量の三次元分布図を示した。 $vr f$ 特徴量は、 f_{ad} によって表面状態ごとに特徴点が分離されていることがわかる。これは、 f_{ad} が表面状態のみに依存する特徴量であることが理由と考えられる。各状態ごとの特徴点分布傾向を次に示す。

Clean, Water: 特徴点が表面材質ごとにまとまっている。各材質の特徴点は離れて分布している。

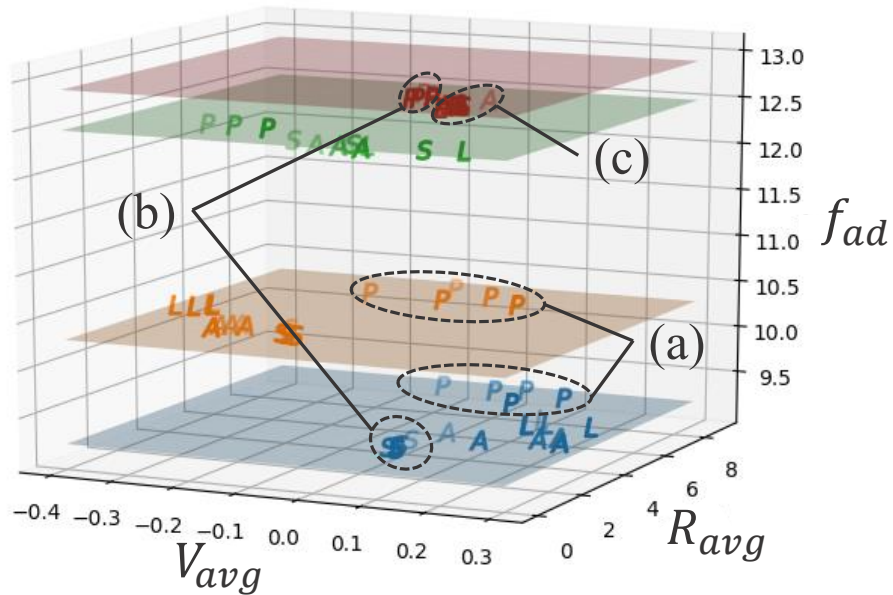
Machine Oil: 特徴点が表面材質ごとにまとまっている。各材質の特徴点は Clean や Water と比べて、比較的近い位置に分布している。

Salad Oil: PVC を除くすべての材質の特徴点が一箇所に集まっている。

Fig. 5.5 中の (a) から (c) は Fig. 5.4 の (a) から (c) に対応している。Fig. 5.4 の (a) では PVC-Clean と PVC-Water が近い位置に分布していたが、Fig. 5.5 では f_{ad} を用いたことで、特徴点を離すことができている。これは、Fig. 5.4(b) の Stainless-Clean と PVC-Salad Oil でも同じことが言える。すなわち、 vr 特徴量で挙げた3種類の問題点のうち、2つは f_{ad} を用いることで解決されたと考えられる。

一方、Fig. 5.4(c) の問題は f_{ad} を用いても解決できていない。Fig. 5.5 において、Machine Oil と Salad Oil は、表面材質が異なる特徴点同士が集合する傾向があった。この原因として考えられるのが、液体による粘性抵抗である。表面に対して払い動作を行うと、抵抗力 \mathbf{f}_r が発生する。抵抗力は、式 (3.2), (3.3) で表される通り、摩擦力 \mathbf{f}_d とせん断抵抗力 \mathbf{f}_s を含んでいる。抵抗力 \mathbf{f}_r を構成するこれらの力において、表面材質の性質を強く表現する力は、

f_s と考えられる。 f_s は表面材質がせん断変形することで発生する力であるが、表面に粘性流体が塗布されている場合にはせん断変形量が微小になると考えられる。 微小なせん断変形量で発生する f_s は微小となる。 このため、 vrf 特徴量空間において V_{avg}, R_{avg} の表面材質間の差が小さくなり、特徴点が一箇所に集合したと考えられる。



P: PVC L: Linoleum A: Acrylic S: Stainless
 ■: Clean ■: Water ■: Machine Oil ■: Salad Oil

Fig. 5.5: The vrf Feature Point.

5.5 まとめ

本章では、払い動作と離し動作で計測された抵抗力情報から、表面材質と表面状態ごとに異なる傾向を持つ表面性状記述特徴量について述べた。払い動作によって計測された抵抗力 mf_r は、表面性状ごとにその大きさおと払い速度 v_w に対する変化傾向が異なる。この特徴から、払い速度 (v_w)、ひっかき硬さ (h_s)、液体粘度 (η) と抵抗力中央値 (mf_r) の相関関係を求め、 mf_r は h_s と η と強い相関を持つことがわかった。強い相関を持つことから、単純な四則演算で特徴量を定義したとしても、これらの情報を損失する可能性は低いと考え、単純な特徴量として vr 特徴量を提案した。

vr 特徴量は平均抵抗力値 (R_{avg}) と平均変化傾向値 (V_{avg}) で求められる。 R_{avg} は表面材質の硬さを表現する値であり、 V_{avg} は表面状態の滑りやすさを表現する値である。 vr 特徴量によって、表面性状ごとに異なった特徴点分布が得られた。

vr 特徴量の問題点として、同一特徴空間において異なる表面性状を持つ特徴点が近い位置に分布するという問題があった。この問題は、 vr 特徴量が払い動作で計測された mf_r のみに依存して求められているため、異なる表面状態を区別できていないことが原因と考えられた。この問題の解決方法として、離し動作によって計測された接着力 f_{ad} を用いて、表面状態ごとに特徴点を分離することが考えられた。

vr 特徴量ベクトルに新たな次元として f_{ad} を追加して作成された $vr f$ 特徴量は、 vr 特徴量の問題点を部分的に解決することが確認できた。 $vr f$ 特徴量によって求められた特徴点は、同一特徴量空間において表面状態ごとにまとまって分布することが確認できた。特に、 f_{ad} の値が小さい Clean や Water は表面材質ごとに離れた位置に特徴点が分布する傾向が確認された。一方で、 f_{ad} の値が大きい Oil 系では表面材質にかかわらず特徴点が一箇所に集合する傾向が確認された。

本章で提案した $vr f$ 特徴量は、表面性状記述特徴量として一定の表現力を有することがわかった。今後の展望として、次の3点を挙げる。

- $vr f$ 特徴量分布を用いた路面の走行可否判定
- $vr f$ 特徴量を用いた材質と状態の推定
- 硬さ計測動作の計測値を用いた特徴量の提案

第6章 災害対応ロボットに向けた走行可否判定

6.1 はじめに

本章では、被災建物内部に投入されるロボットに搭載する事を想定した、表面性状計測に基づく走行可否判定に関して述べる。第1章で述べた通り、本研究では被災した工場やプラントなどの建物内部に遠隔操作型ロボットを投入し、内部調査を行う状況を想定している。安全な遠隔地にいる操縦者は、払い動作と離し動作によって計測された表面性状情報をロボットから受けると、その情報をもとに比較的 안전한移動経路を選択する。その際、対象表面が走行可能である確率（走行可能確率 p_{tr} ）を同時に提示できれば、操縦者の判断の補助になると考えられる。

走行可能確率の定義として、例えば次の方法が考えられる。

1. 三次元空間に存在する平面上で、Fig. 6.1に示すように、原点 O と目標停止位置・姿勢を $SP_t = [x_t \ y_t \ \psi_t]^T$ のように設定する。
2. ロボットを SP_t に移動させたときに、ロボットが実際に停止した位置・姿勢 $SP_r = [x_r \ y_r \ \psi_r]^T$ を求める。
3. 目標位置・姿勢 SP_t と実際位置・姿勢 SP_r の差分 $SP_d (= SP_t - SP_r)$ を求め、その大きさなどに応じて走行可能確率 p_{tr} を 0 から 1 の範囲で表す。

SP_d は、 $0 \leq |SP_d| \leq \epsilon$ ($\epsilon \ll 1$) が常に成立するわけではない。その理由として、移動面の抵抗力 f_r と、移動速度などが考えられる。つまり、例えば移動表面が油まみれだと低い抵抗力 f_r しか得られないため、ロボットが停止指令を出してから SP_r までに多く移動してしまう可能性がある。また、移動速度についても同様に、大きい速度で移動すると長い制動距離が必要になることが考えられる。よって、表面性状に依存した走行可能確率 p_{tr} の算出、及び走行可否判別は実現可能であると期待できる。

しかし、ここまで本研究で提案してきた抵抗力 f_r や接着力 f_{ad} のみを用いて、上記の走行可能確率 p_{tr} を求めることは容易ではない。それは、ロボットが停止しようとするときに発生する抵抗力 $f_r^{(s)}$ が原因である。仮に移動ロボットが車輪型移動ロボットだったとし、Fig. 3.7のような表面性状の計測装置を有しているとする。ロボットが停止指令を出してから実際に停止するまでに表面から受ける抵抗力 $f_r^{(s)}$ は、計測装置が受ける抵抗力 f_r と、左右タイヤが受ける抵抗力 $f_r^{(r)}$ 、 $f_r^{(l)}$ の線形結合になると考えられる。

$$f_r^{(s)} = q^{(0)} f_r + q^{(1)} f_r^{(r)} + q^{(2)} f_r^{(l)} \quad (6.1)$$

式中の $q^{(i)}$ ($i = 0, 1, 2$) はスカラー値の重み係数とする。この $q^{(i)}$ や、 $f_r^{(r)}$ 、 $f_r^{(l)}$ を直接求めることは容易ではない。

本研究では、簡易的に「走行可否」をラベル付けしたデータを基準とし、機械学習を用いて走行可否をシミュレートする。また、分類結果に対して走行可能確率 p_{tr} と特徴量の関係を比較することで、特徴空間における特徴点分布位置と走行可能性の比較を行う。

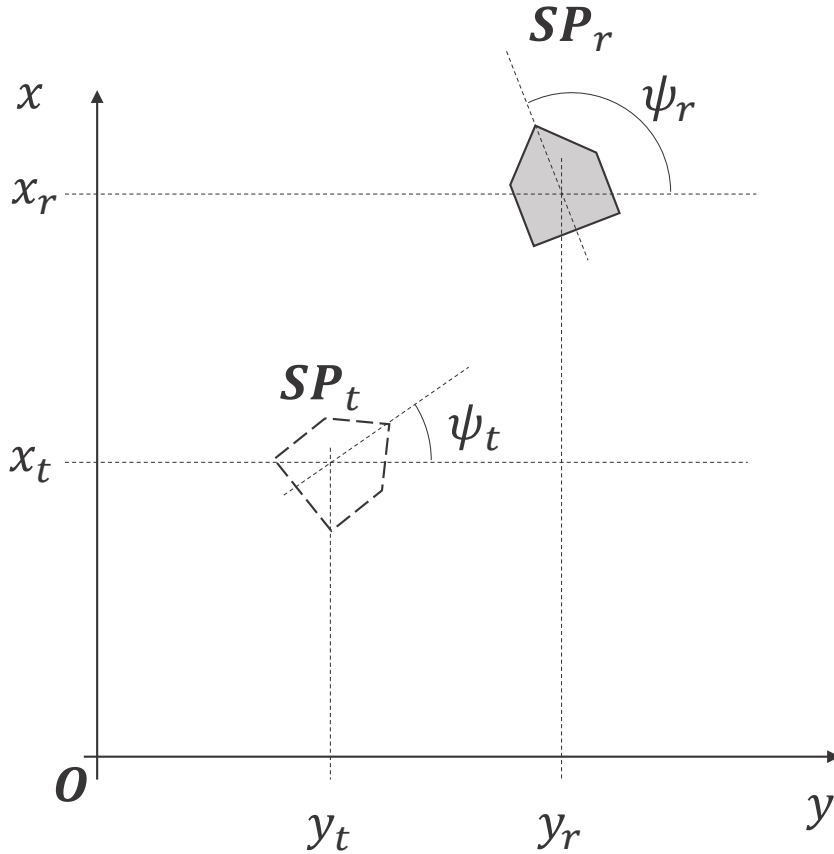


Fig. 6.1: An Example of Position and Posture Definition.

6.2 特徴点分布と疑似特徴点生成

表面性状計測動作では、1 サイクルで v_w の種類数 (N) 分の払い動作と離し動作を行う。すなわち、1 サイクルで N 回分の払い動作結果と離し動作結果を取得する。 vrf 特徴量ではこれら N 回分の計測結果から、1 つの特徴量を求める。つまり、1 サイクルの計測動作で得られる計測値の総数を M 個とすると、その中から $2N$ 個の値のみを使用して 1 つの特徴点を作成していることになる。そこで、特徴点作成に使用されない $M - 2N$ 個の計測値から、擬似的に特徴点を作成する。

更に、 vrf 特徴量に払い速度 v_w を直接用いて特徴量を修正する。 vrf 特徴量に用いられる V_{avg} は払い速度 v_w の種類数で増分の平均値を求めていた。すなわち、 v_w の変化が直接考慮されていなかった。そこで、 V_{avg} を修正した V_{avg}^* を以下の式で求める。

$$V_{avg}^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{mf_r^{(i+1)} - mf_r^{(i)}}{v_w^{(i+1)} - v_w^{(i)}}. \quad (6.2)$$

この特徴量を v^*rf 特徴量とする。 v^*rf 特徴量により、払い速度の影響を低減し、払い速度が大きく異なる 2 種類の特徴点を比較することが可能になると考えられる。

Fig. 6.2に疑似特徴点を作成する方法の概要図を示した。まず、1サイクルの計測動作で取得できる f_r 時系列信号の区間抵抗力 $f_{r(ir)}$ を抽出する。ここから、各 $v_w^{(i)}$ ごとに $f_{r(ir)}$ 値をランダムに1つずつ選択し、 V_{avg} と R_{avg} を求める。1サイクルの計測動作で離し動作は N 回行われる。疑似特徴点作成では、 N 個の f_{ad} からランダムに1つ選択し、 V_{avg}, R_{avg} と合わせて v^*rf 特徴量を作成する。このように擬似的に特徴点を作成すると、1サイクルの計測動作から N 個の特徴点を作成することができる。擬似的に作成した特徴点を v^*rf 特徴点空間に分布した図を Fig. 6.3 に示す。

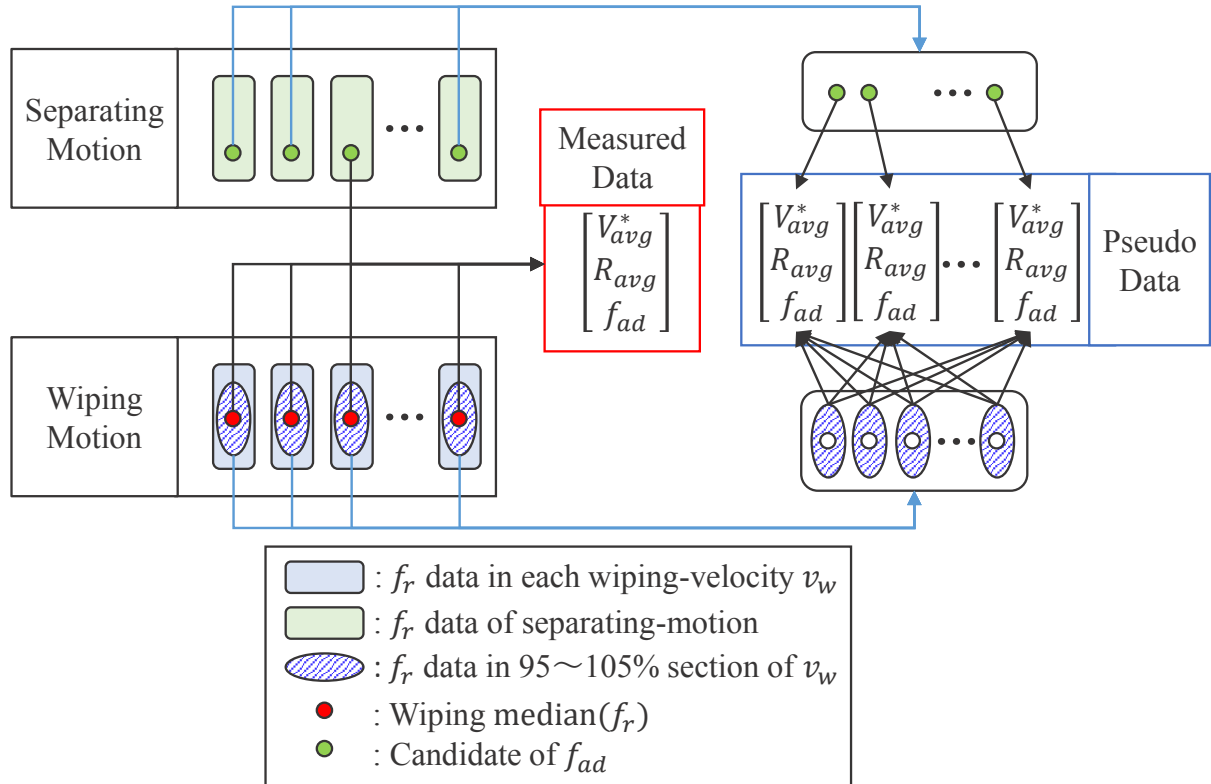
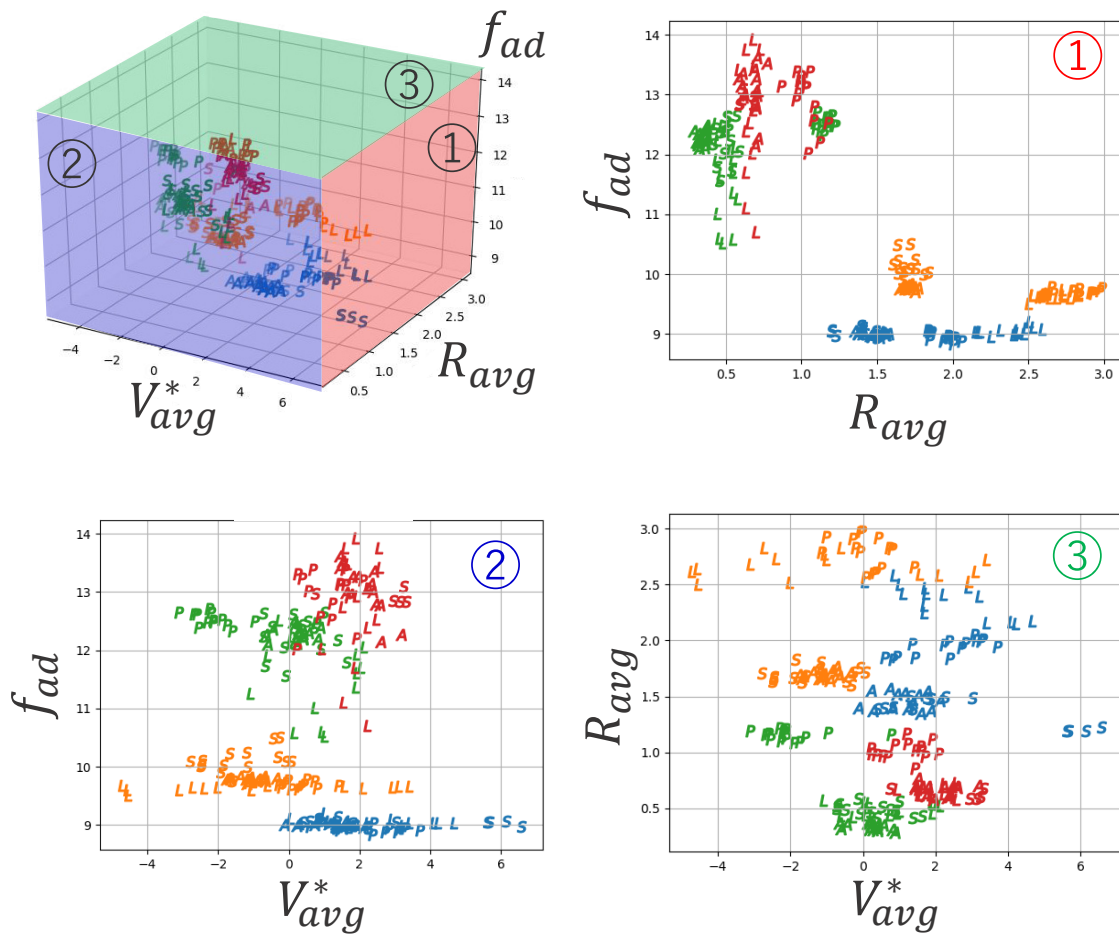


Fig. 6.2: Schematic Diagram about Generating Pseudo Data.



P: PVC L: Linoleum A: Acrylic S: Stainless
 ■: Clean ■: Water ■: Machine Oil ■: Salad Oil

Fig. 6.3: Distribution of v^*r^f Feature Points with Pseudo Data.

6.3 走行可能確率と特徴量の比較

Fig. 6.3 の特徴点分布を用いて走行可否判定を行い、その結果を用いて走行可能確率 p_{tr} と特徴量の軸 $V_{avg}^*, R_{avg}, f_{ad}$ の比較を行う。 v^*rf 特徴点の分布を観察すると、 f_{ad} が大きくなると特徴点が1箇所集合する傾向がわかる。この傾向は第5章 5.4.2 で述べた vrf 特徴量による特徴点分布と共通している。

走行可否判定のためには、教師データが必要となる。教師データは、ある特徴点が行走可能であるか不可能であることを示すものである。本章では、いくつかの判断基準に基づいて走行可能/不可能をラベル付けし、その走行可能確率と V_{avg}^* 軸、 R_{avg} 軸、 f_{ad} 軸の関係を観察する。

走行可能/不可能のラベル付けは、

(case: V): 表面に塗布された液体粘度に基づくラベル付け

(case: H): 表面材質のひっかき硬さに基づくラベル付け

の2通りとした。それぞれのラベル付けを Table 6.1 と Table 6.2 に示す。表中で、走行可能は1、走行不可能は0として表現している。これらのラベル付けは、V-1, V-2, V-3の順に許容する液体粘度が上昇し、H-1, H-2, H-3の順に許容するひっかき硬さが上昇するため、数値が大きい程抵抗力 m_{fr} の値が小さくなるようになっている。

Table 6.1: Labeling for Traversability Estimation Depending on Liquid Viscosity.

	case: V-1	case: V-2	case: V-3
Clean	1	1	1
Water	0	1	1
Machine Oil	0	0	1
Salad Oil	0	0	0

Table 6.2: Labeling for Traversability Estimation Depending on Scratch Hardness.

	case: H-1	case: H-2	case: H-3
PVC	1	1	1
Linoleum	0	1	1
Acrylic	0	0	1
Stainless	0	0	0

これらのラベル付けに対して、走行可能確率 (p_{tr}) を求めた。走行可能確率を求めるにあたり、ロジスティック回帰 [58] を用いた。Fig. 6.4 と Fig. 6.5 に case: V と case: H の分離結果を示す。図は、 v^*rf 特徴空間に分布する特徴点の走行可能確率 p_{tr} を0から1の範囲で表しており、確率が高いほど1に近く赤色になり、確率が低いほど0に近く青色になっている。このとき、各分離境界面は次式で表される。

$$\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_{v^*rf} = \begin{bmatrix} w_0 & w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ V_{avg}^* \\ R_{avg} \\ f_{ad} \end{bmatrix}, \quad (6.3)$$

$$= 0. \quad (6.4)$$

また、ある点 \mathbf{x}'_{v^*rf} が与えられたときに、その点の走行可能確率 p_{tr} は、ロジスティック関数を用いて次式で表される。

$$p_{tr} = \frac{1}{1 + \exp(-\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}'_{v^*rf})} \quad (6.5)$$

$$= \frac{1}{1 + \exp(-(w_0 + w_1 V_{avg}^* + w_2 R_{avg} + w_3 f_{ad}))} \quad (6.6)$$

各分離平面の重み係数を Table 6.3 と Table 6.4 にまとめる。

Table 6.3: Weights of Case: V Series

	w_0	w_1	w_2	w_3
case: V-1	26.07304107	0.268555887	-0.736408151	-2.632746315
case: V-2	14.16032483	-0.141012079	1.22684603	-1.457953072
case: V-3	20.3436943	-0.698628076	-0.740281241	-1.5298659

Table 6.4: Weights of Case: H Series

	w_0	w_1	w_2	w_3
case: H-1	-8.034306944	0.041940421	1.263971554	0.514990036
case: H-2	-7.283063466	0.117709956	1.450212014	0.488373278
case: H-3	-3.745902454	0.041450738	0.788485245	0.309205608

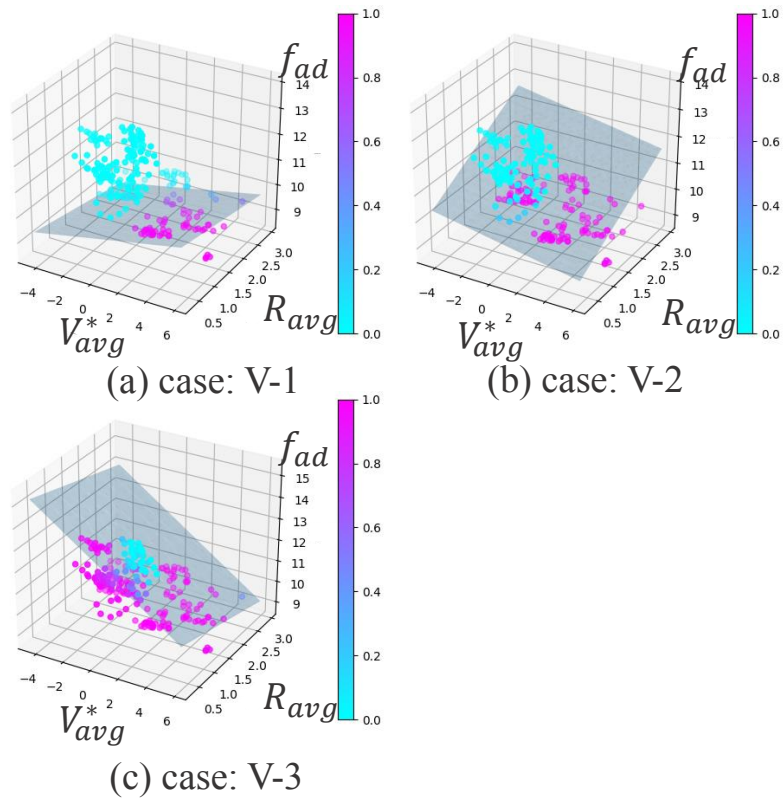


Fig. 6.4: Feature Points Distribution and Separating Plane of Case V.

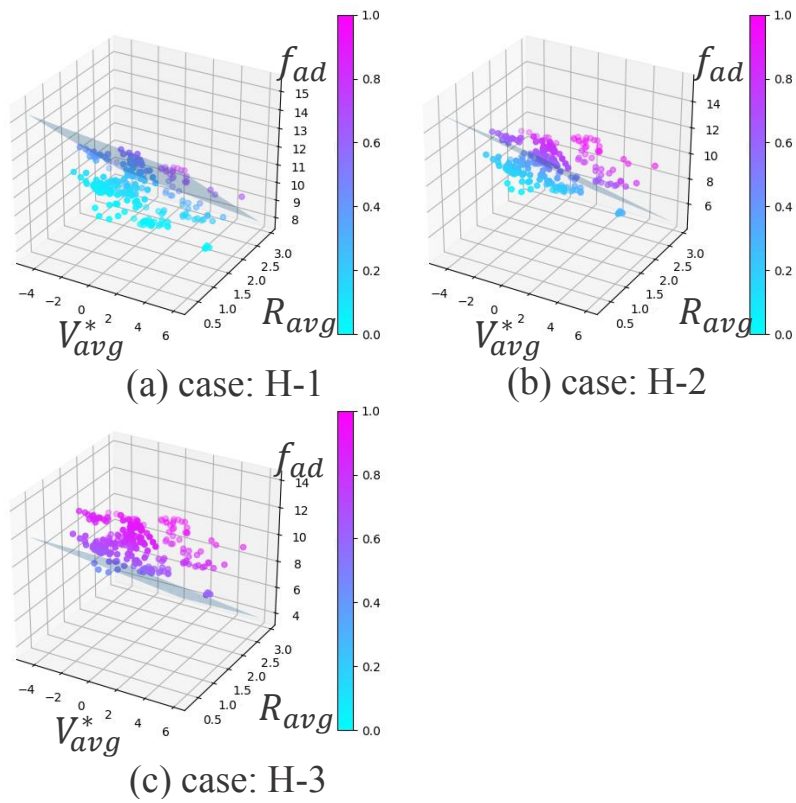


Fig. 6.5: Feature Points Distribution and Separating Plane of Case H.

Fig. 6.6 と Fig. 6.7 には、各ケースにおける走行可能確率と軸の値の関係を示す。各図は、横軸に V_{avg}^* , R_{avg} , f_{ad} を取り、縦軸に走行可能確率 (Traversability) p_{tr} を取って特徴点をプロットした。

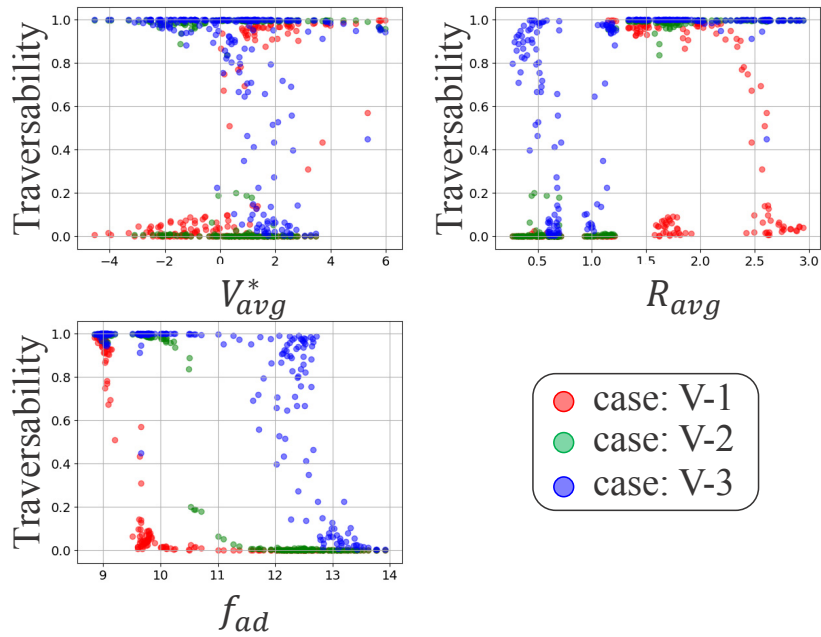


Fig. 6.6: Relationship Between Feature Vector Axis and Traversable Probability in Case V.

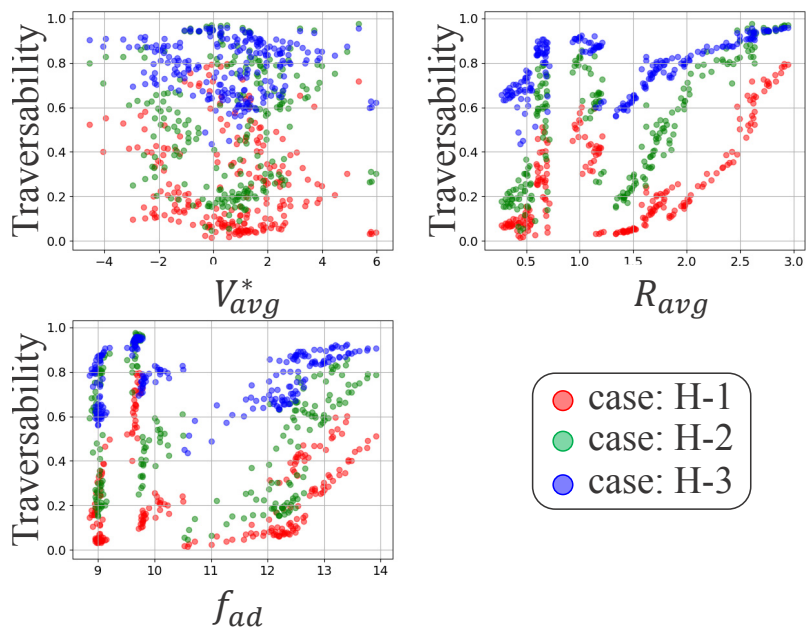


Fig. 6.7: Relationship Between Feature Vector Axis and Traversable Probability in Case H.

最初に, Fig. 6.6 について考察する. 各図から分かることとして, まず, V_{avg}^* は走行可能確率に関係がないことが分かる. 更に, R_{avg} が大きい程走行可能確率が高くなる傾向が分かる. なお, f_{ad} は, 小さい程走行可能確率が高くなる特徴点が多いが, これはラベル付けに起因するものである.

次に, Fig. 6.7 について考察する. Fig. 6.6 の結果と同様に, V_{avg}^* と走行可能確率に強い相関は見られない. また, f_{ad} は, $10.0 \leq f_{ad} \leq 14.0$ にかけて f_{ad} が上昇する程走行可能確率が高くなる傾向が見られる.

これらの結果を総括すると, v^*rf 特徴量における走行可能性について次の事が言える.

- R_{avg} が大きい, すなわち柔らかい材質は走行可能確率が高い傾向を持つ.
- V_{avg}^* は走行可能確率に大きな影響は無い.
- f_{ad} は低いほど走行可能確率が高いが, 柔らかい材質においては, 比較的高い接着力でも走行可能と考えられる.

6.4 まとめ

本章では, 表面性状記述特徴量を用いた走行可否判定手法について述べた. 遠隔操作型移動ロボットが被災建物内を安全に移動するためには, 平坦さの残る表面から比較的安全な表面を選択する必要がある. 比較的安全な面を選択するためには, 遠隔操縦者へ対象表面の走行可能性情報を提示する必要がある. 走行可能性情報は, ロボットが行う払い動作と離し動作で計測された抵抗力 f_r から求める. f_r から記述特徴量を求め, 特徴点の分布位置から対象表面の走行可能確率を求めることで, 走行可否判定が可能となる.

本章では, $vr f$ 特徴量を改変した v^*rf 特徴量を提案し, 特徴点分布に対してロジスティック回帰を用いることで走行可能/不可能の確率を求めた. 得られた走行可能確率と V_{avg}^* , R_{avg} , f_{ad} の値を比較した結果, 柔らかい材質程走行可能確率が高く, 接着力が低い表面程走行可能確率が高いことがわかった.

今後の課題を以下に述べて, 本章を締めくくる.

- データ収集の効率化
- 実環境における走行可否判定実験
- 走行可能性を考慮した移動経路探索
- 視覚情報への重畳表示

第7章 表面性状推定

7.1 はじめに

本章では、表面性状計測の応用として、表面性状推定について述べる。ここでは、計測された抵抗力を用いた特徴量に対して、機械学習アルゴリズムを用いて学習と推定を行う。

被災建物の内部状況を把握する場合、対象表面の材質や状態を把握することで、遠隔操縦者はより詳細な状況を把握できるようになる。更に、材質と状態の情報をもとに、状況に適した行動を選択することが可能になると考えられる。例えば、液体の有無による移動経路検討や、表面の硬軟情報によるロボット操縦パラメータ変更などが挙げられる。そのため、表面性状推定で求める材質や状態として、液体の有無、表面の硬軟、液体の種別、表面の種別などが必要となる。本章では、表面性状推定として、これらの推定を行う。

7.2 カーネルSVMを用いた表面性状推定

7.2.1 Support Vector Machine

Support Vector Machine (SVM) [58] とは、機械学習アルゴリズムの一種で、特徴空間中に存在する特徴点位置とそのラベルに基づいて、分離超平面を求める手法である。例えば、Fig. 7.1 のように、2次元平面上に2種類の特徴点が分布している場合を考える。これらの特徴点は、それぞれ $\{-1, +1\}$ のラベルが振られており、ラベルごとに特徴点が集合しており、線形に分離できるとする。このとき、これらの特徴点群を分離する分離境界を求める際に用いられる一手法がSVMである。分離境界を求めるにあたり、マージンが最大となる境界超平面（ここでは直線）を求める手法である。このとき、解くべき最適化問題は次式で表される。

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \quad \text{s.t.} \quad y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + w_0) \geq 1. \quad (7.1)$$

また、ある程度の誤分類を許す場合、ソフトマージンと呼ばれる手法が用いられる。式(7.1)には、全てのデータを正しく識別できるという条件が設定されていた。ソフトマージンではこの制約を弱めることで、多少の誤分類を許容するようにする。

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum \xi_i \quad \text{s.t.} \quad y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + w_0) \geq 1 - \xi_i, \quad \xi_i \geq 0. \quad (7.2)$$

式(7.2)の ξ_i はスラック変数と呼ばれる小さな値を持つ変数である。 ξ_i は*i*番目のデータが正しく識別できるという制約を満たしていない度合いを表す。 C は ξ_i の影響をどれほど受けるかを定めるハイパーパラメータで、 C が大きいほど誤分類を許容しなくなり、 C が小さくなるほど誤分類を許容するようになる。

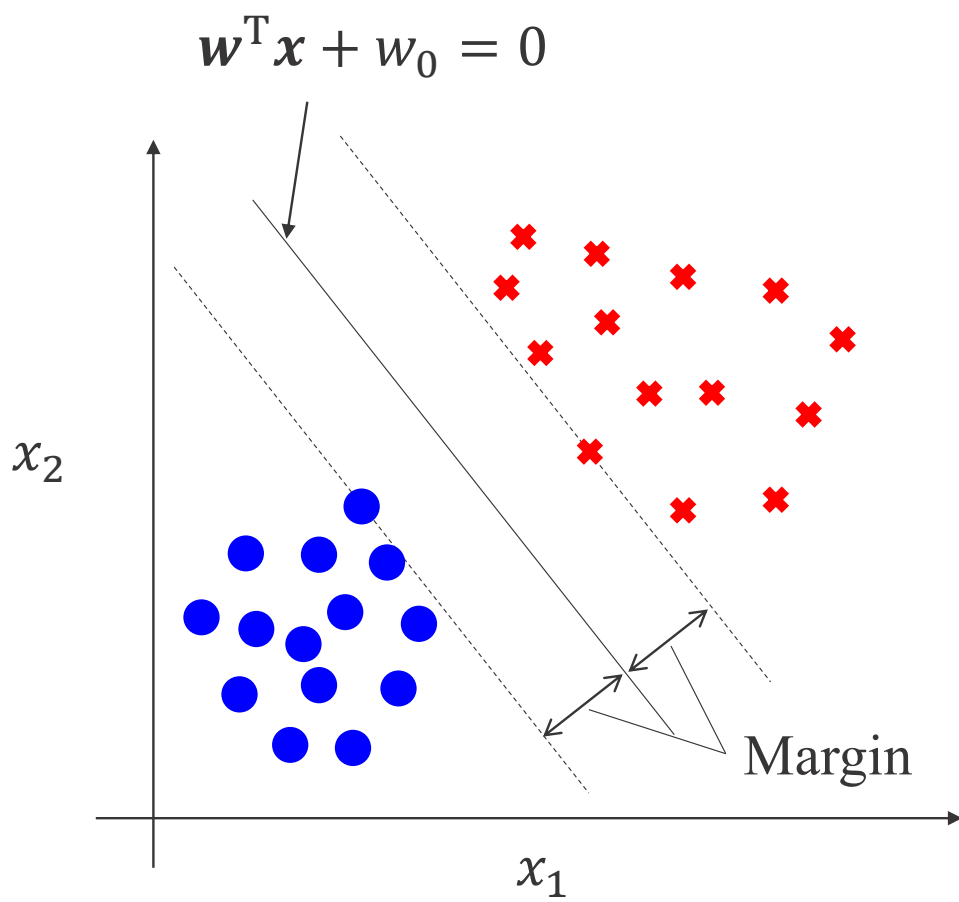


Fig. 7.1: Schematic Diagram of SVM

7.2.2 カーネル法

カーネル法は、よく SVM と組み合わせて使われる手法である。SVM では、前提条件として「線形分離可能」とされている。そのため、Fig. 7.2(a) のように線形分離不可能な対象では性能を発揮できない。このような対象を分離するためには、Fig. 7.2(b) のように特徴空間への写像が考えられる。特徴空間への写像で発生する問題として、写像後の次元が極端に増加する可能性があるということが挙げられる。カーネル法は、そのような場合に用いられる手法であり、写像を陽に求めずに、入力次元を特徴次元に写像する方法である。

よく用いられるカーネルには、多項式カーネル (式 (7.3)), 動径基底関数 (RBF) カーネル (式 (7.4)) などが挙げられる。

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = (r + \gamma \mathbf{x}^T \mathbf{x}')^d \quad (d \in \mathbb{N}), \quad (7.3)$$

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2). \quad (7.4)$$

なお、各式中の r , d , γ はハイパーパラメータである。

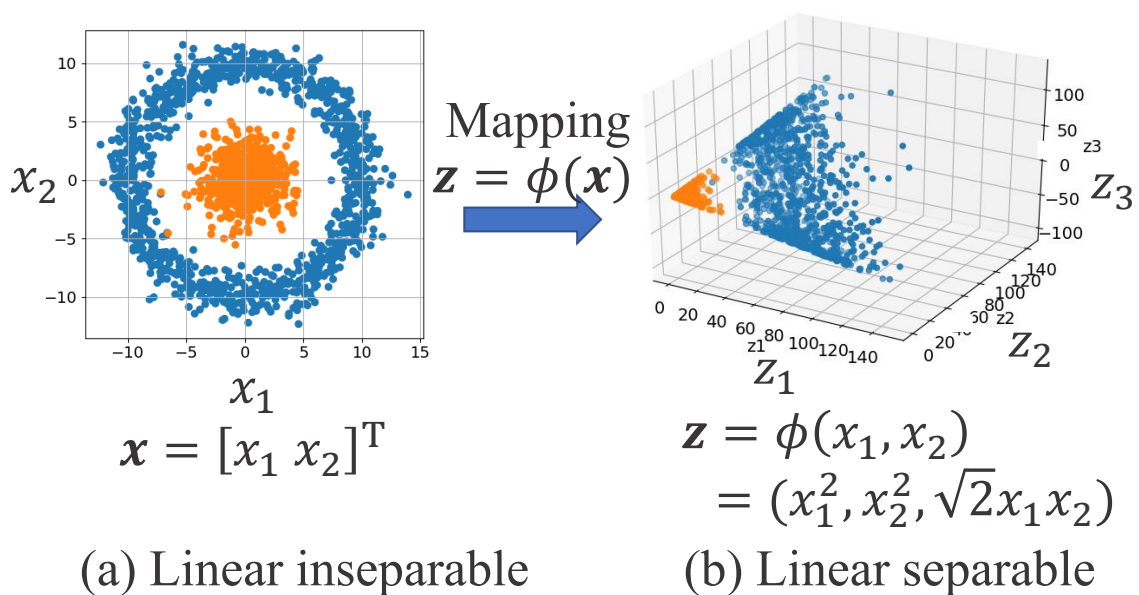


Fig. 7.2: Linear Inseparable Data and Mapped Linear Separable Data.

7.2.3 表面性状推定への適用

第6章で提案した v^*rf 特徴量を用いて求めた疑似特徴点の分布に対して、カーネルSVMを用いて表面性状推定を行う。カーネルを用いる理由として、Fig. 6.3に示す特徴点分布は線形分離不可能と考えられるためである。Cleanとその他、あるいはClean及びWaterとその他を分離するだけであれば、分布位置からもわかる通り、カーネルを用いないSVMでも分離可能と考えられる。しかし、例えば「Salad OilとMachine Oilを分離したい」という場合や「全ての状態におけるPVC, Linoleumとその他を分離したい」場合などには、単純なSVMの適用は困難であると考えられる。

この原因は、払い動作と離し動作によって計測された抵抗力 f_r や接着力 f_{ad} が、表面性状に左右されるためである。これらを線形分離可能な特徴点分布にするには、計測動作のさらなる工夫や、別の新たな特徴量の提案、計測装置の改良などが必要となる。しかし、そのような方法は、計測動作が複雑になったり、計測装置が複雑になる可能性があり、新たな問題が発生する可能性がある。本章では、 v^*rf 特徴点分布から表面性状を推定するために、カーネルSVMを用いる。

カーネルはRBFカーネルを用い、カーネルのパラメータはグリッドサーチで決定する。また、表面性状推定実験では、1. 液体有無判別、2. 表面硬軟判別、3. 硬軟+液体有無判別、4. 液体名+材質名推定の合計4種類の推定実験を行う。各実験は、疑似特徴点分布に対してn-fold交差検証を行い、各クラスラベルごとの平均認識率を比較することで評価する。

7.3 表面性状推定

7.3.1 液体有無判別

本実験では、特徴点分布に対して液体が有る (presence)/無い (absence) の2クラス分類を行う。本実験が想定する状況は、遠隔操作ロボットで移動するにあたり、液体が存在しない領域を選択して移動したいという状況である。耐水性が低いロボットや、液体による汚染を極力避けたい状態において、水や油が散乱している空間を移動する場合などが想定される。2クラス分類において、設定するクラスラベルは、Table 7.1の通りである。

Table 7.1: Liquid Presence/Absence Class Label

Class Label	Surface Condition
absence	Clean
presence	Water
	Machine Oil
	Salad Oil

また、Fig. 7.5には、Table 7.1のラベルごとに色分けされた特徴点の分布を示す。この特徴点分布に対してRBFカーネルを用いたSVMを適用し、分離境界平面を求める。

Fig. 7.4には、グリッドサーチによるパラメータ推定結果を示す。この図は、横軸に γ 、縦軸に C を取った。各ハイパーパラメータの探索範囲は、それぞれ $10^{-10} \leq \gamma \leq 10^2$ 及び $10^{-2} \leq C \leq 10^{10}$ とした。各グリッドに該当する γ と C を用いたときに、正答率が高いパラメータを採用したところ、 $C = 10.0$ 、 $\gamma = 1.0$ となった。選択されたパラメータは、図中の赤四角で囲まれている。

これらのパラメータを用いて、5-fold交差検証を行った。全データ数は N 個で、各交差検証で学習に用いたデータ数は $N_{train} = 0.8N$ 個で、テストに用いたデータ数は $N_{test} = 0.2N$ 個である。Table 7.2に5回の平均推定結果を示す。*Precision*、*Recall*、*F-measure*の各意味は、巻末の付録に記す。平均正答率 (Accuracy) は99.1%となった。

Table 7.2: Average Estimation Rate in Liquid Presence/Absence Estimation

	Precision	Recall	F-measure
absence	0.98	0.98	0.98
presence	0.99	0.99	0.99

この結果から、払い動作と離し動作によって求められる v^*rf 特徴量は、液体の有無を高精度で判別可能であるということがわかる。よって、遠隔操縦者に対象表面の表面性状情報を提示するにあたり、液体の有無判別情報は信頼できると考えられる。

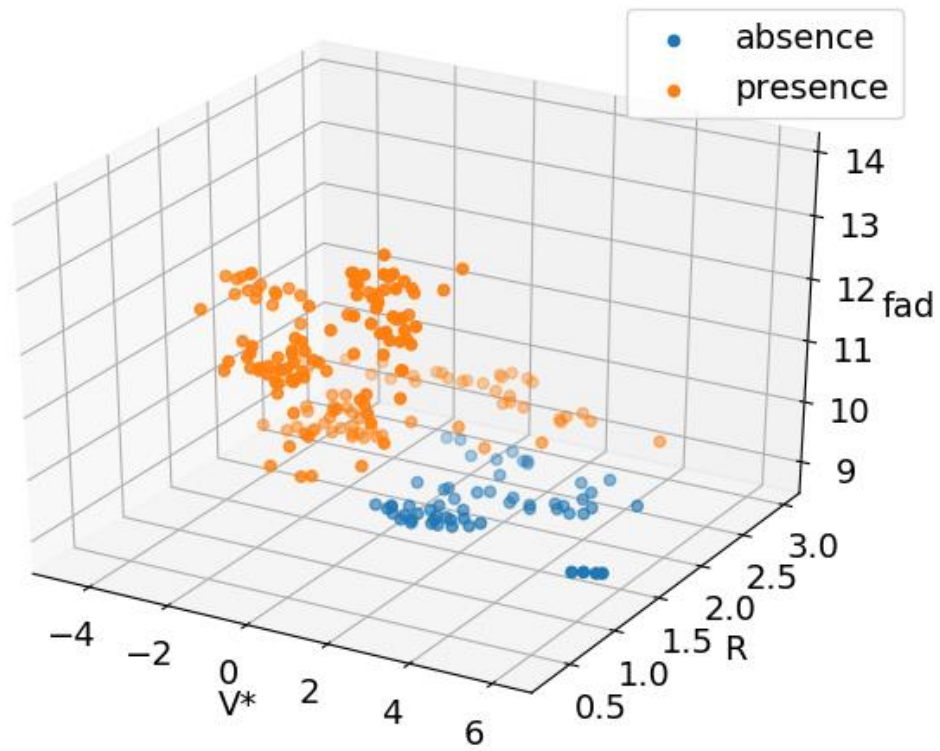


Fig. 7.3: Feature Points Distribution about Liquid Presence

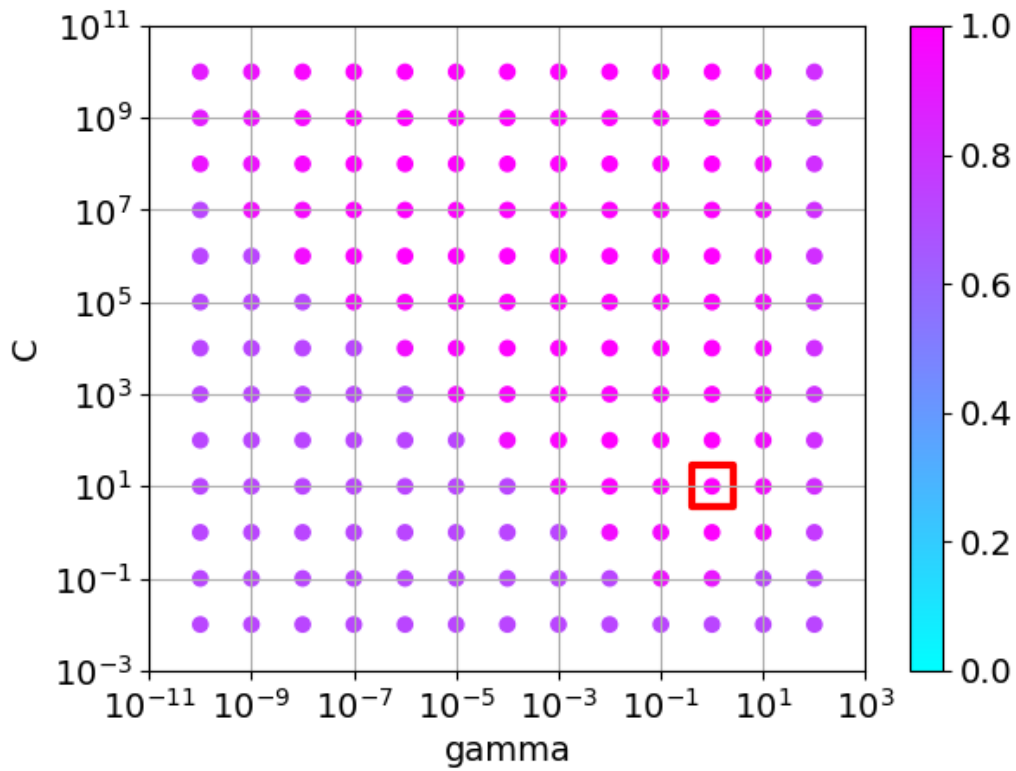


Fig. 7.4: Result of Grid Search for Liquid Presence Estimation

7.3.2 表面の硬軟判別実験

続いて、表面材質が硬いか柔らかいかを判別する実験について述べる。例えば、可能な限り硬い表面を走行したい場合や、摩擦力が高いと想定される柔らかい表面を走行したい場合などに必要となる判別である。

第4章で計測した、Table 4.1に挙げられる4種類の板材を「硬い」、「柔らかい」に分け、これらを正しく推定できるか実験する。これら4種類の板材を、硬い/柔らかいの2つに分類するにあたり、定量的な判別指標は存在しない。そこで、本実験では、Table 4.1の Scratch Hardness (Spring) の値を参考にし、以下のようにクラスラベルを設定した。

Table 7.3: Hard/Soft Discrimination Class Label

Class Label	Surface Material
soft	PVC Linoleum
hard	Acrylic Stainless

実験に用いる学習器は7.3.1と同様に、RBFカーネルを用いたSVMを採用する。Fig. 7.6にはグリッドサーチによって求めたハイパーパラメータの結果を示す。本実験では、 $10^{-6} \leq \gamma \leq 10^1$ 及び $10^1 \leq C \leq 10^8$ の範囲で探索し、 $C = 10^5$, $\gamma = 0.01$ とした。

Table 7.4に5-fold交差検証の平均推定結果を示す。平均正答率 (Accuracy) は88.6%となった。

Table 7.4: Average Estimation Rate in Surface Hard/Soft Discrimination

	Precision	Recall	F-measure
hard	0.83	0.96	0.89
soft	0.96	0.81	0.88

こけ結果から、対象表面の硬軟をTable 7.3のように分割した場合、硬い表面と柔らかい表面は約90%の精度で推定可能であることが分かる。前述の通り、表面が硬いか柔らかいかを明確に決定する客観的指標は存在しないが、表面の引っかき硬さを参考に硬軟を決定できると考えられる。

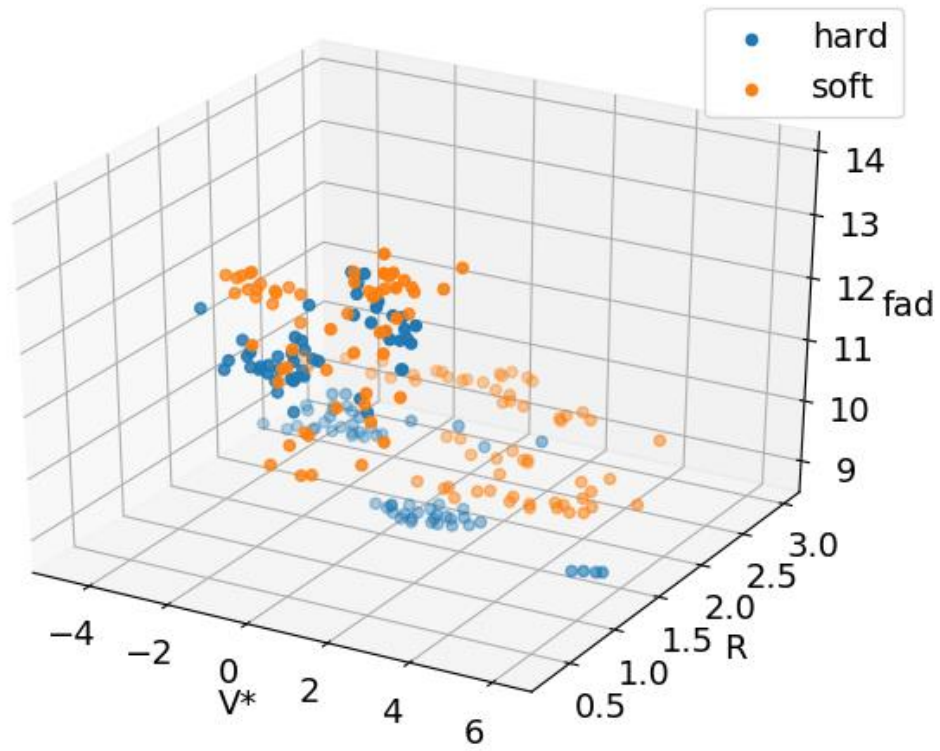


Fig. 7.5: Feature Points Distribution about Liquid Presence

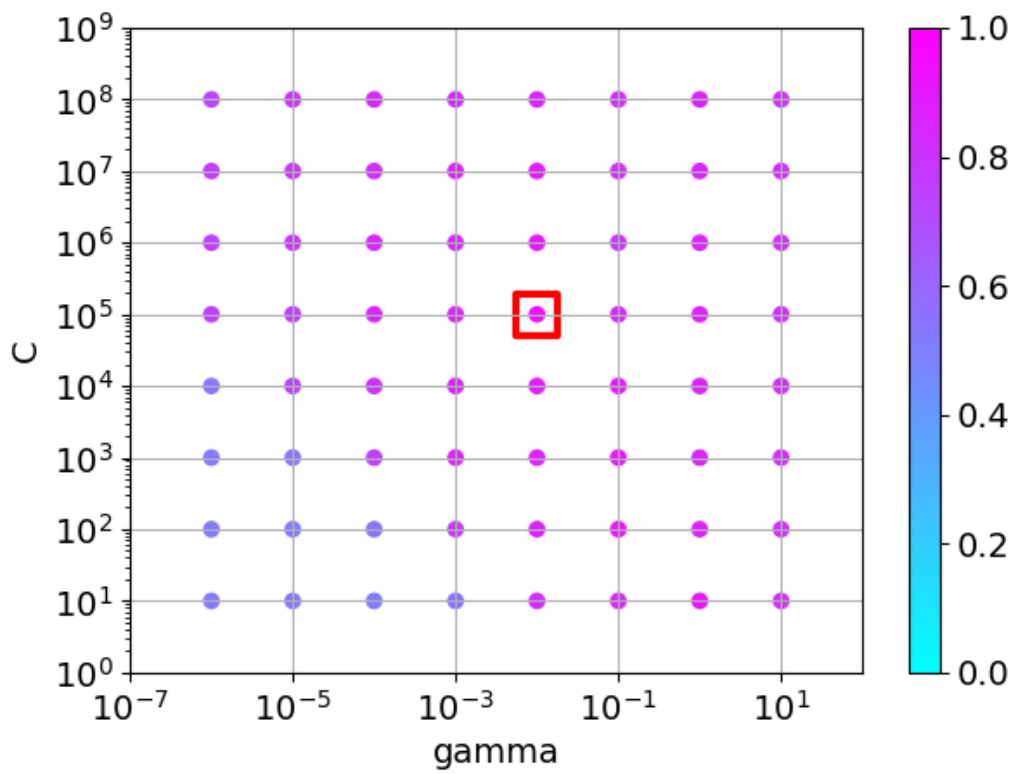


Fig. 7.6: Result of Grid Search for Hard/Soft Discrimination

7.3.3 硬軟と液体有無の同時判別

7.3.1 と 7.3.2 の推定を同時に行うことを考える。これは、状況設定として、「柔らかく、液体が存在しない領域」を移動したい場合などに必要となる。この推定が可能になることで、被災建物内部の状況により適した、表面性状推定が可能になる。

Fig. 7.7 には特徴点の分布を示す。特徴点の色分けは、Table 7.1 と Table 7.3 の組み合わせで決定されている。この図からわかるとおり、4 クラス分類において、「柔らかい+液体がある」(soft:presence) と「硬い+液体がある」(hard:presence) の分布位置が近いことから、これらを単純に線形分離することは困難であると考えられるが、RBF カーネルを利用することで、このような対象の分離が可能になると期待される。

Fig. 7.8 には、グリッドサーチによるパラメータ推定結果を示す。探索範囲は、 $10^{-7} \leq \gamma \leq 10^2$ 及び $10^{-2} \leq C \leq 10^7$ とした。グリッドサーチによって $C = 100$, $\gamma = 0.1$ が得られた。

Table 7.5 に 5-fold 交差検証の平均推定結果を示す。平均正答率 (Accuracy) は 91.6% となった。

Table 7.5: Average Estimation Rate in Hard/Soft and Liquid Presence/Absence Estimation

	Precision	Recall	F-measure
hard:absence	1.0	1.0	1.0
hard:presence	0.85	0.95	0.89
soft:absence	0.97	1.0	0.98
soft:presence	0.94	0.83	0.88

Table 7.5 の結果から、液体の有無と表面の硬軟の同時推定は比較的高い精度で推定できることが分かった。液体の有無判別と比較して推定精度が低下した原因は、表面の硬軟判別の推定精度が比較的低い事と、 f_{ad} が大きい場合に特徴点が一箇所に集合する傾向が原因と考えられる。第 6 の結果を鑑みると、走行可能とされるべき高粘度液体が堆積した柔らかい表面において、表面の硬軟判別精度は低下すると考えられる。

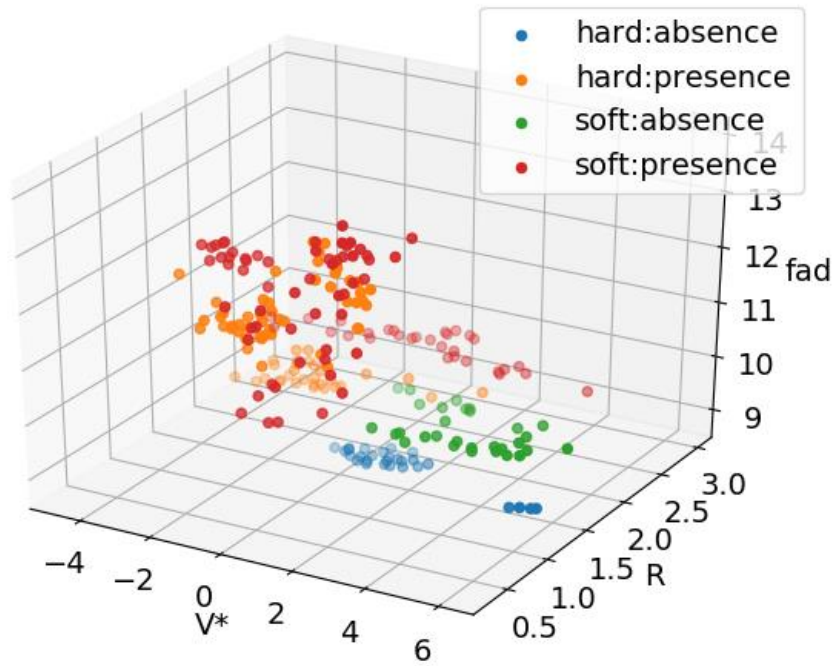


Fig. 7.7: Feature Points Distribution about Hard/Soft and Liquid Presence/Absence Estimation

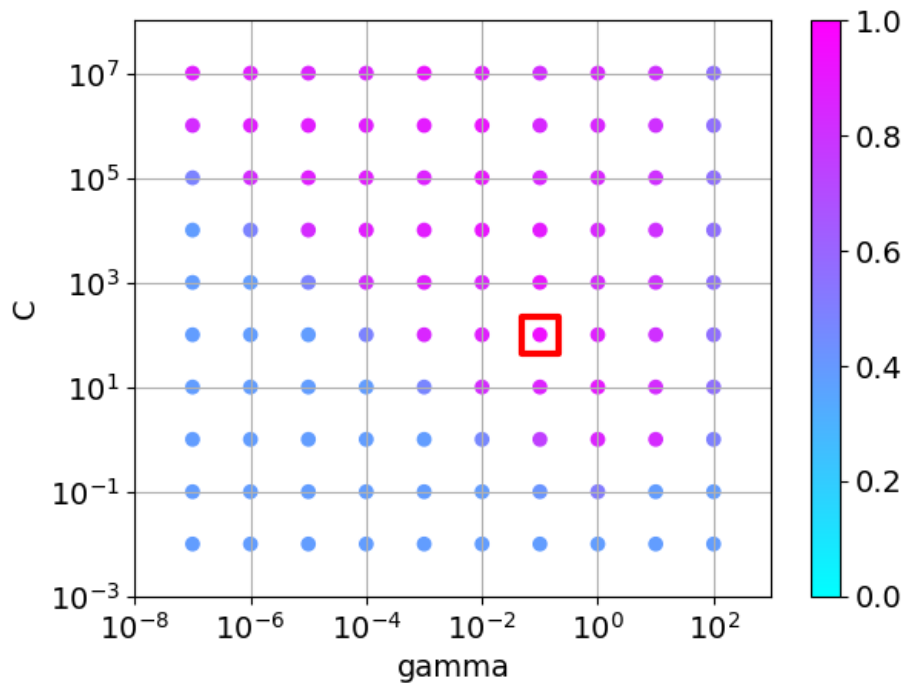


Fig. 7.8: Result of Grid Search for Hard/Soft and Liquid Presence/Absence Estimation

7.3.4 材質名+状態名推定

最後の実験として、表面材質と表面状態を推定する実験について述べる。表面性状推定において、前述の3種類の実験では、液体の種別は行っていない。被災環境を移動する場合において、水と油が散乱した領域を移動しなくてはならない状況も考えられる。そのような状況では、油を避けて水のみが塗布された領域を移動するほうが、後の活動への支障が少なくなると考えられる。

本実験では、表面の状態名と材質名を推定し、液体種別と材質種別を行う。特徴点の分布は Fig. 6.3 に示す通りである。推定器の学習にあたり、パラメータ探索範囲は、 $10^{-10} \leq \gamma \leq 10^2$ 及び $10^{-1} \leq C \leq 10^{10}$ で探索を行い、 $C = 10^4$, $\gamma = 0.01$ とした。Fig. 7.9 にグリッドサーチで探索した結果を示す。

Table 7.6 に 5-fold 交差検証の平均推定結果を示す。平均正答率 (Accuracy) は 80.3% となった。

Table 7.6: Average Estimation Rate in Surface Property Name Estimation

	Precision	Recall	F-measure
clean:pvc	0.95	0.93	0.93
clean:linoleum	1	0.93	0.96
clean:acrylic	0.52	0.73	0.6
clean:stainless	0.63	0.6	0.57
water:pvc	0.95	0.93	0.93
water:linoleum	0.95	0.93	0.93
water:acrylic	0.95	1	0.97
water:stainless	1	0.93	0.96
machineoil:pvc	0.9	0.93	0.9
machineoil:linoleum	0.71	0.53	0.57
machineoil:acrylic	0.95	1	0.97
machineoil:stainless	0.72	0.73	0.71
saladoil:pvc	0.95	0.93	0.93
saladoil:linoleum	0.55	0.4	0.43
saladoil:acrylic	0.47	0.53	0.47
saladoil:stainless	0.8	0.8	0.8

Table 7.6 に示された結果から、oil 系と clean:acrylic および clean:stainless の推定精度が他と比べて低いことが分かる。まず、oil 系の推定精度が低いことは、5.4.2 で述べた課題 (c) が原因と考えられる。 f_{ad} が高い値の場合、特徴点が一箇所に集合してしまう。これは、 V_{avg}^* や R_{avg} の値が表面性状ごとに大きな違いを出していないことを意味している。すなわち、 f_{ad} が高い場合、表面状態の影響が大きくなり、表面材質を判別するのに十分な情報が得られなくなる。そのため、カーネル SVM を用いた表面性状推定でも十分な推定結果が出なかったと考えられる。

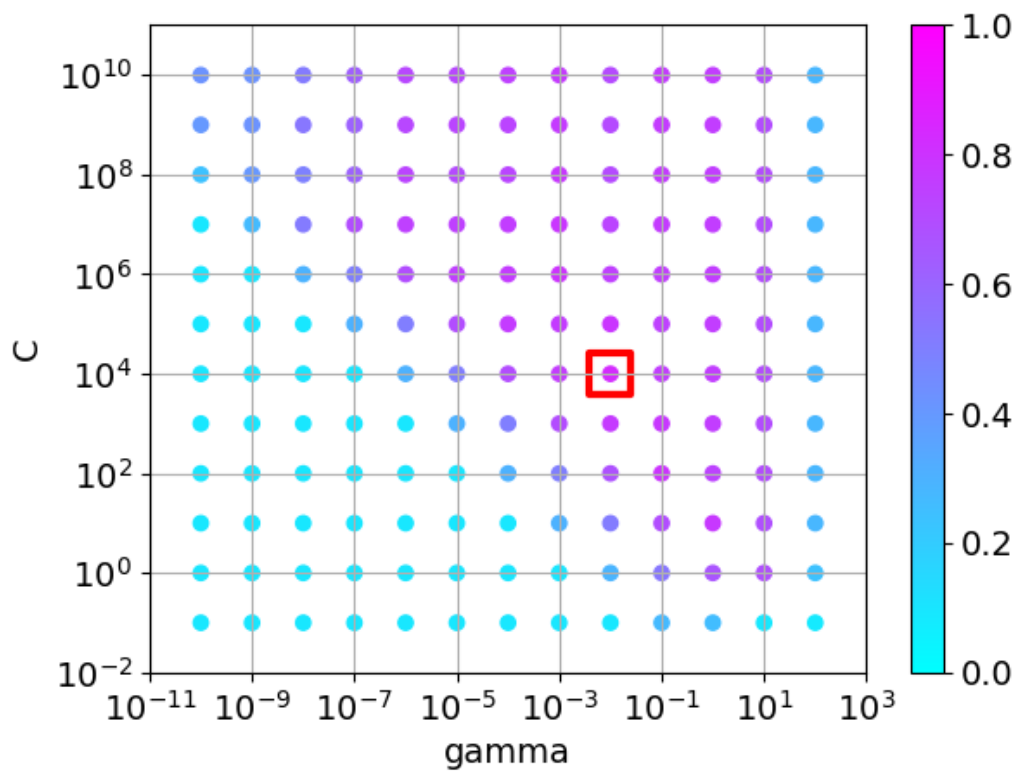


Fig. 7.9: Result of Grid Search for Surface Property Name Estimation

Table 7.7: Confusion Matrix of Surface Property Name Estimaiton

	c:p	c:l	c:a	c:s	w:p	w:l	w:a	w:s	m:p	m:l	m:a	m:s	s:p	s:l	s:a	s:s
c:p	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c:l	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c:a	0	0	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c:s	0	0	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w:p	0	0	0	0	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w:l	0	0	0	0	2	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w:a	0	0	0	0	0	0	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0
w:s	0	0	0	0	0	0	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0
m:p	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	1	0	0	0
m:l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	1	5	0	0	1	0
m:a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0
m:s	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	10	0	0	0	0
s:p	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	14	0	0	0
s:l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	6	6	0
s:a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	12	1
s:s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4

Table 7.7 には、推定結果の混合行列を示した。表は縦軸が真のラベル、横軸が推定されたラベルであり、各セルの値は推定された個数を表している。縦横軸のラベルは、Table 7.6 のラベル名と同じだが、紙面サイズの関係上略記している（例えば、clean:pvc ならば頭文字を取って c:p としている）。この結果を見ると、推定率が低かった clean:acrylic と clean:stainless の推定結果は、お互いに入れ替わった結果を示している。つまり、真のラベルは clean:acrylic なのに対して、clean:stainless と推定された結果がいくつか存在し、真のラベルが clean:stainless の場合にも、clean:acrylic と推定された結果がいくつか存在している。これも、oil 系と類似した原因と考えられ、 f_r の大きさや v_w に対する変化傾向が近い値を持っていたため、 V_{avg}^* と R_{avg} が近い値を持ったことが原因と考えられる。

一方、Table 4.1 に示された引っかかり硬さを観察すると、Acrylic と Stainless の大きさの差は、 $|h_s^{(Stainless)} - h_s^{(Acrylic)}| = 0.636$ であり、PVC と Linoleum の差 $|h_s^{(Linoleum)} - h_s^{(PVC)}| = 0.694$ と比べて大差は無い。また、Fig. 4.7 を観察しても、 f_r の大きさの差は約 1 N ほどあることが分かる。この違いを考慮すると、これらの表面の推定精度が低いことは矛盾しているように考えられる。

これは、 v^*rf 特徴量を計算するために、新たに計測した値が Fig. 4.7 の値を計測したときと異なっていた可能性があるためと考えられる。表面性状計測実験では、非常に多くの回数の抵抗力計測を行った。そのため、接触板カバーや、対象表面が劣化したと考えられる。この劣化により、 f_r の大きさが過去と変わってしまった可能性が考えられる。 v^*rf 特徴量に用いられる、 V_{avg}^* と R_{avg} は払い動作で計測された f_r から直接計算される。そのため、 f_r の変化に敏感である一方で、劣化などの変化に対する頑健性にまだ課題が残る。この課題を解決するには、離し動作のように、払い動作と独立した計測動作で表面の硬さを計測する動作を用いる方法が考えられる。そのような動作として、表面を押し込んだ際に得られる反発力を計測するという動作が考えられる。

7.4 まとめ

本章では、 v^*rf 特徴量を用いて表面性状推定を行った。ここでは、液体有無判別、表面の硬軟判別、液体有無+硬軟判別、材質名+状態名推定の計4種類の推定実験を行った

本章で実施した4種類の推定実験により、液体有無判別、表面の硬軟判別、表面性状名推定が比較的高い精度で推定できることが分かった。特に、液体有無判別は第1章で述べた通り、視覚情報では判別困難とされているが、接触計測によって判別できることが示された。また、表面の硬軟判別により、災害対応ロボットの状況に合わせた行動を取れる可能性が示されたと考える。一方、表面性状名推定では、他の推定と比較して低い精度となった。この原因として、計測装置と対象表面の劣化を挙げ、劣化に対応する方法として押し込み動作による硬さ直接計測を挙げた。

以上の実験により、提案計測動作で計測された表面性状情報から、表面性状を推定可能であることが示された。今後の展望として、推定対象の追加や、装置改良などが挙げられる。

第8章 結言

8.1 各章を総括したまとめ

本研究では、被災した工場やプラントなどの内部調査を行う際に用いられる遠隔操作ロボットに必要とされる表面性状計測計測について述べた。表面性状認識は、災害対応ロボットの分野における環境認識において重要な課題の一つであるが、これまであまり活発に議論されてこなかった。その原因として、表面性状がどのように構成されるのかがはっきりとわかっていないことや、表面性状を計測する方法が確立されていなかったからだと考えられる。

本研究は、表面性状認識を行うために必要となる、新たな表面性状計測手法を確立することを目的とし、実施された。表面性状認識のための基礎的研究として、表面性状計測手法を提案した。

第1章では、被災環境における表面性状認識の重要性を述べ、関連研究から本研究の立ち位置を述べた。また、表面性状計測方法として、視覚情報に基づく非接触計測方法と触覚に基づく接触計測方法がある事を述べ、接触計測の利点を述べた。更に、接触計測に用いる力覚センサや触覚センサの問題点を述べ、人間のように質感を計測できるセンサが存在しないことと、触覚による接触計測の難しさについて述べた。接触計測では、新たなセンサを開発する代わりに、計測動作を工夫することで表面性状を計測するという事を述べた。

第2章では、本研究で扱う問題設定として、床面等の平坦面を対象とし、表面に液体が塗布されている状態で表面材質と表面状態を表現できる計測値を得る事を対象とする事を述べた。また、表面性状を構成する要素を潜在要素として列挙し、計測可能な情報のうち多くの潜在要素が関係している情報として、「摩擦力」、「表面反力」、「粘性抵抗」を挙げ、これらを計測することで、表面性状情報を計測できる可能性を示した。

第3章では、本研究で提案する計測動作として、払い動作と離し動作について説明した。払い動作は、荷重をかけながら表面を撫でる動作を指し、動摩擦力と表面反力からなる抵抗力 f_r を計測できる動作である事を述べた。特に、払い速度 v_w を変えながら払い動作を適用することで、表面性状ごとに異なる抵抗力を計測できる可能性を、動摩擦力が滑り速度に依存して変化する事を挙げて説明した。更に、表面の接着力 f_{ad} を計測する動作として、離し動作を提案した。

離し動作は、接触状態にある2面を引き離す動作であり、表面の状態によってそのときに受ける粘性抵抗が変化する。また、接着力は表面に塗布された液体の粘度によって変化する事を、粘性抵抗の定義から説明した。更に、これらの動作が互いに独立しているため、組み合わせが容易であり親和性が高い事を述べ、払い動作と離し動作を組み合わせた表面性状計測動作について説明した。

第4章では、提案動作の有効性を検証する実験を行った。そこでは、計測装置の形状選定実験、表面性状計測実験、接着力計測実験が行われた。装置形状選定実験では、5つの形状の払い装置から、払い動作に適した装置形状を実験的に検討した。実験では、4種類の板材を用い、乾いた表面に対して払い動作を行った。払い動作で得られた f_r が、表面材質ごとに異なる装置形状を選択した結果、回転軸が地面に近く、800 gのおもりを有する Type E

が払い装置に適している事を示した。

表面性状計測実験では、表面に水やサラダ油を塗布した状態を用意し、払い動作で抵抗力 f_r を計測する実験を行った。実験結果から、表面性状ごとに異なる f_r が計測できることを示し、払い動作の有効性を示した。

接着力計測実験では、離し動作で表面状態ごとに異なる f_{ad} を計測する実験を行った。実験では、Clean, Water, Machine Oil, Salad Oil の4種類の表面状態を用意し、各表面で離し動作を行った。実験結果から、表面状態ごとに異なる f_{ad} を計測できる事がわかった。更に、 f_{ad} が液体粘度 η と類似した傾向を持つ事がわかり、離し動作の有効性を示した。

第5章では、計測動作で得られた f_r と f_{ad} を用いて表面性状を記述する特徴量を提案した。提案特徴量は2種類あり、 vr 特徴量と $vr f$ 特徴量を提案した。

払い動作によって f_r が、表面の硬さと表面の粘性の情報を有している可能性について、相関係数行列を用いて説明した。 vr 特徴量は、表面の硬さを表現する“平均抵抗力値”と、表面の粘性を表現する“平均変化傾向値”で構成される。また、 vr 特徴量で計算される特徴点分布から、 vr 特徴量の課題として、異なる表面性状を表す特徴点が近い位置に分布することを述べた。

$vr f$ 特徴量は、 vr 特徴量の問題点を改善した特徴量で、 f_{ad} を vr 特徴量の新たな次元として追加した。 $vr f$ 特徴量により、 vr 特徴量の問題点の一部を解決し、表面状態ごとに特徴点を分離できることを示した。

第6章では、表面性状情報を用いた走行可否判定について述べた。ここでは、特徴点分布位置に基づく走行可能性を探るため、走行可能確率と特徴量の基底を比較した。様々な特徴点の分布を得るため、 $vr f$ 特徴量を改変した $v^* r f$ 特徴量を提案し、疑似特徴点を作成することでデータを水増した。走行可能確率の計算には、硬さの違いに基づくラベル付けと液体粘度の違いに基づくラベル付けをした特徴点を用意し、ロジスティック回帰により走行可能確率を求めた。

得られた走行可能確率に対して、 V_{avg}^* 軸、 R_{avg} 軸、 f_{ad} 軸とそれぞれ比較し、各軸と走行可能確率の関係について考察を行った。比較結果から、 V_{avg}^* と走行可能確率の関係性は小さく、 R_{avg} と f_{ad} が走行可能確率に関係を持つことが分かった。考察から、 R_{avg} が大きいほど走行可能確率が高く、 f_{ad} が小さいほど走行可能確率が高い事が分かった。

第7章では、記述特徴量の分布位置に基づく表面性状推定実験を行った。表面性状推定は、液体有無判別、表面の硬軟判別、液体有無+硬軟判別、材質名+状態名推定の計4種類の推定実験が行われた。推定は、RBF カーネルを用いた SVM で行われた。実験結果から、4種類のどの推定においても、80%以上の推定精度を得られる事が分かった。一方で、推定精度が一番低かった結果に対して、計測装置や対象表面の劣化について検討し、提案手法が劣化に対して少なからず脆弱性を有している事を指摘した。

本研究では、新たな表面性状計測方法の提案及び、走行可否判定、表面性状推定を目的とした研究を行った。研究成果から、高度で複雑なセンサを用いなくとも、単純な計測動作を組み合わせることで、従来研究では計測が困難だった対象を計測出来、有意な情報を計測できる事を示した。また、記述特徴量を用いた、走行可否判定や、表面性状推定の可能性を示した。

8.2 本研究を総括した今後の展望

本論文では、各章ごとに今後の展望を記した。改めて下記する。これらの課題は、本研究の成果から解決できる可能性のある短期的課題である。

- 払い速度低速化と払い動作有効性検証
- 払い装置小型軽量化
- 離し動作の多方向利用
- 硬さ計測動作の提案
- 視覚情報との統合
- 実環境における走行可否判定実験
- 走行可能性を利用した移動経路探索

本研究の全体を包括し、今後本研究の進む方向として次の課題が考えられる。これらの課題は多くの未解決問題を含んでいるが、挑戦しがいのある題材であり、これらを解決することで、触覚と計測の分野をより発展させうるものとする。

- 計測動作拡張と一般化
- 表面性状調査と表面性状回復
- 複雑形状表面への適用
- 物体ハンドリングへの応用

以下に各題材について示し、本論文を締めくくる。

計測動作拡張と一般化:

提案手法の払い動作と離し動作以外の動作の提案と一般化を行う。本研究で提案した計測動作は、別の見方をすると、払い動作は表面の変化特性を調査する動作であり、離し動作は表面状態の影響を調査する動作と捉えられる。提案動作の他にも、例えば物体の硬さを計測するデュロメータという計測装置のように表面を押し込む動作や、表面を叩く動作、ねじる動作などが考えられる。これらの動作を組み合わせることで表面性状計測に最適な計測動作を調査し、各動作の組み合わせ方を検討する。

複雑形状表面への適用:

第2章で、本研究で扱う対象を平坦な面とした。本課題では、この拘束条件を外し、より一般的な形状で表面性状計測動作を行う方法を検討する。課題遂行のため、計測装置を多自由度マニピュレータに取り付け、曲面に払い動作や離し動作を適用する方法を提案する。また、アスファルト舗装道路のように、極端に粗い面に表面性状計測動作を適用する方法を検討する。

物体ハンドリングへの応用:

物体把持などで物体操作をする際に、対象の表面性状を把握する方法を検討する。滑りやすい物体や壊れやすい物体を把持する場合、適切な把持力を求める必要がある。対象を操作する前に、対象に表面性状計測動作を適用し、操作対象の表面性状を認識し、適切な把持力などを求める方法を検討する。

表面性状調査と表面性状回復:

被災環境におけるロボットの移動や、物体操作を想定すると、移動や操作に適さない対象でも避ける事が出来ない可能性がある。例えば、泥が堆積した面を横切る必要がある場合や、油まみれの物体を持ち上げる必要がある場合などがこれに該当する。そのような状況に対応するためには、対象の表面性状を変化させる方法が考えられる。そのため、対象表面に対して操作を行い、性状を変化させ、目的を遂行できる状態にする方法を検討する。

謝辞

本研究は、信州大学 工学部 機械システム工学科 山崎公俊准教授の指導の下で行われました。山崎公俊先生には、学部4年生から6年半にわたって、研究や研究室生活におけるあらゆる面で大変お世話になりました。また、途中心身の都合で研究が停滞する状況に陥った私に、寛大なご理解とご支援を賜り、研究を再開する事ができました。謹んで感謝申し上げます。

自律知能システム研究室に配属されたばかりで、研究をほとんど何も知らなかった学部4年生の私に、山崎先生は一から一つづつ教えて下さいました。それは、研究テーマの決め方に始まり、論文の選び方、報告資料の作り方、論文の書き方、実験の進め方、実験結果の分析方法に至るまで、非常に多くを教えていただきました。他にも、機械系出身でプログラミングや機械学習などの知識と経験が乏しかった私に対し、非常に基礎的な内容から懇切丁寧に指導していただきました。

立ち上げ当初少人数だった研究室では、そのフットワークの軽さと山崎先生の精力的な活動により、勉強会や見学会などの様々なイベントに参加することができました。そのような機会に恵まれ、自分の視野を広げることができたことは、とても貴重な経験でした。ありがとうございました。

研究の進め方、気持ちの持ち方、日常生活の送り方など、山崎先生から学ぶべきことは非常に多くありました。在学中にすべてを吸収することはできませんでしたが、研究者として尊敬する山崎先生に、一歩でも近づけるよう精進したいと思います。

信州大学 先端領域融合研究群 社会基盤研究所 長濱虎太郎講師には、研究や研究室生活において様々なアドバイスを頂きました。深く感謝いたします。

長濱先生とは、学部4年生から研究室見学や学会などで交流がありました。直接的な共同研究は有りませんでした。関連研究を紹介してくださったり、研究で悩んでいる私に適切なアドバイスを多数下さいました。大変ありがとうございました。

年齢が近いのもあってか、剣道や居合、趣味の話でよく談笑しておりましたが、研究、趣味、雑談のどれを取っても、その背景知識の広大さに常に驚かされるばかりでした。長濱先生のような理論的で幅広く、同時に深い背景知識を持つことは、個人的な目標です。常に良い刺激を与えてくださり、ありがとうございました。

信州大学 工学部 学術研究院 Solvi Arnold 助教には、研究に関するアドバイスを頂いた他、論文執筆の際の英文校正において多大な助力を頂きました。深く感謝いたします。

Solvi先生とは、日常会話こそあまり多く有りませんでした。報告会や勉強会などで私が見落としがちな項目についての的確なコメントを常に頂きました。山崎先生や長濱先生とはまた異なった角度から問題をとらえ、的確なコメントをするその洞察力と俯瞰的視点に驚かされていました。

また、修士2年次終盤から参加させていただいた、ImPACT TRC ではフィールド評価会に参加するたびに補助していただきました。博士2年次のImPACT TRC フィールド評価会でデモをすることになった際に、画像情報による表面材質推定システムを作成して頂き、本当にありがとうございました。あのシステムがなくてはデモを実現することすら出来な

かったと思います。残念ながら本論文では視覚情報との統合処理までたどり着きませんでしたが、Solvi先生が作って下さったシステムによって、視覚情報との統合という新たな視点が生まれたことは、本当に感謝しております。ありがとうございました。

本論文の審査において、大変有益なご指導とご教示を頂いた、信州大学 工学部 機械システム工学科 千田有一教授、高山潤也准教授、中山昇准教授、金沢大学 理工学域 フロンティア工学類 渡辺哲陽教授には深く感謝いたします。

信州大学 工学部 機械システム工学科 辺見信彦教授、吉野正人教授、松原雅春教授には接着力に関して機械力学的観点及び流体力学的観点からご助言を賜りました。深く感謝いたします。

信州大学 工学部 機械システム工学科 種村昌也助教には、接着力の基本式の検討に関して数学的観点からご助言を賜りました。深く感謝いたします。

信州大学 工学部 電子情報システム工学科 白井啓一郎准教授には、講義を通して最適化理論についてご指導いただき、信号処理に関するご助言や論文構成に関するご指導を賜りました。深く感謝いたします。

信州大学 工学部 機械システム工学科事務補佐員 市川恵里殿、千田研究室元事務補佐員 山岸彩子殿、山崎研究室事務補佐員 東山亜湖殿には、学会やRAにおける様々な事務手続きにおいて多大なご助力を頂きました。

研究室生活では、日常的に多くの後輩に支えていただきました。特に、研究の合間の意見交換で有益な意見交換をしてくれた田中大輔君、莫亜強君には非常に感謝しております。田中氏と莫氏には、論文作成における様々な議論に応じて頂いただけでなく、日常生活においても様々な情報交換や技術的補助をして頂きました。二人の支えには非常に感謝しております。ありがとうございました。

研究室全員の名前をここに挙げて謝辞を述べることは出来ませんが、その他多くの人々に支えていただき、本論文をまとめることが出来ました。深く感謝いたします。

最後に、信州大学における9年間半の学生生活において多大な支援を頂いた両親、姉、妹夫婦、叔母に心から感謝いたします。家族や親戚の支えなくしては、学生生活及び研究生活を続けることはできませんでした。本当にありがとうございました。

付録A

A.1 混合行列 (Confusion Matrix)[58]

ここでは、第7章で出た Accuracy, Precision, Recall, F-measure について説明する。二値分類問題において、推定クラスと真のクラスに基づいて、推定結果を表 A.1 のように分けるとする。ここで、表中の TP, FP, FN, TN は以下に該当する個数である。

Table A.1: Confusion Matrix of Binary Classification

		Actual Label	
		Positive	Negative
Predicted Class	Positive	TP	FP
	Negative	FN	TN

TP: 真に Positive で、Positive と推定された個数

FP: 真に Negative で、Positive と誤推定された個数

FN: 真に Positive で、Negative と誤推定された個数

TN: 真に Negative で、Negative と推定された個数

このとき、Accuracy, Precision, Recall, F-measure は次式で表される。

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}, \quad (A.1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (A.2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (A.3)$$

$$F - measure = \frac{2Recall \cdot Precision}{Recall + Precision}. \quad (A.4)$$

すなわち、各指標は以下の意味を示す。

Accuracy: Positive, Negative と推定したデータのうち、実際に Positive や Negative であったものの割合

Precision: Positive と推定したデータのうち、実際に Positive であるものの割合

Recall: 実際に Positive であるもののうち、Positive であると予測されたものの割合

F-measure: Precision と Recall の調和平均

参考文献

- [1] 総務省消防庁 (2012) 『東日本大震災記録集』 消防庁.
- [2] 菅沼 直孝, 上原 拓也, 中村 紀仁: “原子炉建屋内の運搬作業を担う 4 足歩行ロボットの制御技術”, 東芝レビュー = *Toshiba review*, Vol. 69, No. 10, pp. 48 – 51, 2014.
- [3] 久武 経夫, 中里 邦子: “大災害に立ち向かうロボットの開発”, 建設の施工企画, 740 号, pp. 42 – 47, 2011.
- [4] Kengo Toda, Hideaki Yamamoto, Masaharu Shimizu, Takashi Kodachi, Tomoaki Yoshida, Takeshi Nishimura, Takayuki Furuta, “Camera Arm System for Disaster Response Robots (2nd Report: A Collision Protection Mechanism for Real-world Missions),” *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science(ICDES2014)*, pp. 80–85, 2014.
- [5] 大野 和則, 竹内 栄二郎, 永谷 圭司, 田所 諭, 小柳 栄次, 吉田 智章: “レーザスキャナと移動ロボットを用いた被災空間の密な 3 次元計測”, *IPSS SIG-Computer Vision and Image Media(CVIM)*, Vol. 2011, No.176, pp. 1–8.
- [6] Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Satoshi Tadokoro, Kazuya Yoshida, Keiji Nagatani, Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Shoichi Maeyama, Itsuki Noda, Osamu Takizawa, Yasushi Hada, “A High Mobility 6-Crawler Mobile Robot ‘Kenaf’ ,” *Proceedings of 4th International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster (SRMED2007)*, pp.38, 2007.
- [7] Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, “Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development,” *Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics*, pp. 225-230, 2010.
- [8] Inho Lee, Jaesung Oh, Inhyeok Kim, Jun-Ho Oh, “Camera-laser fusion sensor system and environmental recognition for humanoids in disaster scenario,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, Issue 6, pp. 2997–3003, 2017.
- [9] S. Arnold, K. Yamazaki, “Real-time scene parsing by means of a convolutional neural network for mobile robots in disaster scenarios,” *IEEE International Conference on Information ans Automation*, pp. 136 – 141, 2017.
- [10] Ilya Lysenkov, Vincent Rabaud, “Pose Estimation of Rigid Transparent Objects in Transparent Clutter,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 162 – 169, 2013.

- [11] Koichiro Matsumoto, Kimitoshi Yamazaki, “An object classification framework based on unmeasurable area patterns found in 3D range images,” *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering(CASE)*, pp. 242 – 248, 2014.
- [12] 大岡 昌博, 三矢 保永, 松永 泰明, 高柳 旬一: “光導波形三軸触覚センサ搭載ロボット・マニピュレータによる表面段差の識別”, 日本機械学会論文集 (C編), 65 巻, 637 号, pp. 187 –193, 1999.
- [13] 尾股 定夫: “硬さ測定触覚センサ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp. 908 – 909, 1991.
- [14] 河合 隆志, 平野 雄一, 前野 隆司: “把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発”, 日本機械学会論文集 (C編), 64 巻, 627 号, pp. 156 – 162, 1998.
- [15] 井上 喜雄, 劉 涛, 足立 渡, 芝田 京子, 塩島 康造, 辻内 伸好: “移動式フォースプレートの開発 -柔軟でウエアラブルな床反力センサ-”, バイオメカニズム学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 241 – 243, 2012.
- [16] 向井 優, 野田 善之: “六軸力覚センサの原理と構造”, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 4, pp. 303 – 306, 2018.
- [17] 石川 正俊, 下條 誠: “感圧導電性ゴムを用いた圧力センサ”, バイオメカニズム学会誌, Vol. 6, No. 3, pp. 46 – 51, 1982.
- [18] 神山 和人, 梶本 裕之, 稲見 昌彦, 川上 直樹, 舘 暉: “触覚カメラ – 弾性を持った光学式 3 次元触覚センサの作成 –”, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), 123 巻, 1 号, pp. 16 – 22, 2003.
- [19] T. Yamamoto, N. Wettels, J. A. Fishel, C.-H. Lin, G. E. Loeb: “BioTac –生体模倣型触覚センサ–”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 5, pp. 496 – 498, 2012.
- [20] 篠田 裕之: “ヒトのように触れる”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 12 巻, 3 号, pp. 150 – 155, 2007.
- [21] 下條誠・前野隆司・篠田裕之・佐野明人編 (2013) 触覚認識メカニズムと応用技術 - 触覚センサ・触覚ディスプレイ -』S&T 出版.
- [22] F. Holzwarth and U. Eichhorn, “Non-contact sensors for road conditions,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 37–38, pp. 121-127, 1993.
- [23] 久野 徹也, 杉浦 博明, 吉田 潤一: “車載カメラによる路面状態検出方式の検討”, *The Journal of Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers. D-II*, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2301–2310, 1998.
- [24] 齊藤 祐紀, 池本 直隆, 山崎 憲, 穂積 順一, 石原 成浩, 藤波 研次: “画像による路面状態の検出に関する基礎的研究 –路面の反射特性について–”, *The Annual Meeting record I.E.E. Japan*, Vol. 2003, No. 1, pp. 226–227, 2003.
- [25] Tomoaki Teshima, Yuko Uematsu, Hideo Saito, “Detection of The Wet Area of The Road Surface Based on a Saturated Reflection,” *Meeting on Image Recognition and Understanding 2007(MIRU2007)*, pp. 1218–1223, 2007.

- [26] Manuel Amthor, Bernd Hartmann, Joachim Denzler, “Road Condition Estimation Based on Spatio-Temporal Reflection Models,” *37th German Conference, GCPR 2015 Proceedings*, pp. 3–15, 2015.
- [27] 後藤 泰介, 田村 仁: “移動体に搭載可能な摩擦係数推定システムの構築”, 情報科学技術フォーラム講演論文集, 10 巻, 3 号, pp. 301 – 304, 2011.
- [28] Hitoshi Tamura, Yasushi Kambayashi, “Estimation of Coefficient of Static Friction of Surface by Analyzing Photo Images,” *Intelligent Decision Technologies 2016*, Vol. 57, pp. 15–26, 2016.
- [29] M. Brandao, K. Hashimoto, and A. Takanishi, “Friction from vision: a study of algorithmic and human performance with consequences for robot perception and teleoperation,” *2016 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2016.
- [30] Anelia Angelova, Larry H. Matthies, Daniel M. Helmick, Pietro Perona, “Learning and prediction of slip from visual information,” *Journal of Field Robotics - Special Issue on Space Robotics*, Vol. 24 Issue3, pp. 205–231, 2007.
- [31] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, M. Morisawa, K. Fujiwara, K. Harada, H. Hirukawa, “Slip Observer for Walking on a Low Friction Floor,” *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 634 – 640, 2005.
- [32] H. Liu, X. Song, T. Nanayakkara, K. Althoefer, L. Seneviratne, “Friction Estimation Based Object Surface Classification for Intelligent Manipulation,” *IEEE ICRA 2011 workshop on autonomous grasping*, 2011.
- [33] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, P. Lischinsky, “A New Model for Control of System with Friction,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp. 419 – 425, 1995.
- [34] Pedro Domingos and Michael Pazzani, “On the Optimality of the Simple Bayesian Classifier under Zero-One Loss,” *Machine Learning*, 29, pp. 103 – 130, 1997.
- [35] Kai Way Li, Wen-Ruey Chang, Tom B. Leamon, Chin Jung Chen, “Floor slipperiness measurement: friction coefficient, roughness of floors, and subjective perception under spillage conditions,” *Safety Science*, Vol. 42, Issue 6, pp. 547 – 565, 2004.
- [36] 新村出編 (1991) 『広辞苑 (第 4 版)』 岩波書店.
- [37] JIS B 0031 : 2003. 製品の幾何特性仕様 (GPS)-表面性状の図示方法
- [38] 大西清著 (2010) 『JIS にもとづく機械設計製図便覧 (第 11 版)』 理工学社.
- [39] 田中 由浩, 堂本 和樹, 佐野 明人, 藤本 英雄: “バルーンの膨張現象を利用した触覚センサ –生体適合型センサシステムの開発–”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 811 – 820, 2010.
- [40] 菊植 亮, 中村 建太, 山本 元司: “表面評価のための指先装着型触覚センサ”, 日本機械学会論文集 (C 編) , 77 巻, 784 号, pp. 4567 – 4580, 2011.

- [41] 白土 寛和, 前野 隆司: “触感提示・検出のための材質認識機構のモデル化”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 9 巻, 3 号, pp. 235 – 240, 2004.
- [42] 白土 寛和, 昆陽 雅司, 前野 隆司: “ヒトの触感認識機構のモデル構築”, 日本機械学会論文集 (C編), 73 巻, 733 号, pp. 2514 – 2521, 2007.
- [43] 松川 宏: “摩擦の物理”, 表面科学, Vol. 24, No. 6, pp. 328 – 333, 2003.
- [44] F. P. Bowden and L. Leben, “Nature of Sliding and the Analysis of Friction,” *Nature*, Vol. 141, No. 3572, pp. 691 – 692, 1938.
- [45] F. P. Bowden and D. Tabor, “The friction and lubrication of solids Part1,” *Clarendon Press*, 1950.
- [46] F. P. Bowden and D. Tabor, “The friction and lubrication of solids Part2,” *Clarendon Press*, 1950.
- [47] 佐々木信也・志摩政幸・野口昭治・平山朋子・地引達弘・足立幸志・三宅晃司著 (2014) 『はじめてのトライボロジー』 講談社.
- [48] 山本雄二・兼田楨宏著 (2010) 『トライボロジー』 オーム社.
- [49] O. Reynolds, “On the theory of lubrication and its application to Mr. Beuchamp Towers experiments,” *Phil. Trans. R. Soc.*, 177, pp. 157 –234, 1886.
- [50] B. A. Francis, R. G. Horn, “Apparatus-specific analysis of fluid adhesion measurement,” *Journal of applied physics*, Vol. 89, No. 7, pp. 4167 – 4174, 2001.
- [51] Randy H. Ewoldt, Piotr Tourkine, Gareth H. McKinley, A. E. Hosio, “Controllable adhesion using field-activated fluids,” *Physics of fluids*, Vol. 23, Issue 7, 073104, 2011.
- [52] JIS K5600-5-4 : 1999. 塗料一般試験方法-第5部: 塗膜の機械的性質-第4節: 引っかき硬度 (鉛筆法)
- [53] ISO 4586-2 : 2004. High-pressure decorative laminates - Sheets made from thermosetting resins - Part2: Determination of properties.
- [54] <https://www.taylor-hobson.jp/products/surface-profilers/handheld-surtronic/surtronic-s-100-series-surface-roughness-tester>
- [55] 阪東茂, 渡辺敦志, 坪内孝司, 辻信行, 油田信一: “ハードウェア情報もオープンにした研究用プラットフォームとしての標準的小型移動ロボット i-Cart mini”, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 2013.
- [56] http://www.leptrino.co.jp/P_CFS.html
- [57] E. クライツィグ著, 田栗正章訳, 近藤次郎・堀素夫監訳 (2012) 『技術者のための高等数学=7 確率と統計 原書第 8 版』 培風館.
- [58] 荒木雅弘著 (2014) 『フリーソフトではじめる機械学習入門』 森北出版.

研究業績

学位申請に用いる原著論文

1. Koichiro Matsumoto, Kimitoshi Yamazaki, “An Experimental Study on Surface State Description by Wiping Motion for the Estimation of Floor Surface Condition Using Indoor Search Robot,” *ROBOMECH Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 11-19. (2018)

学位申請に用いる国際会議発表論文（査読付き，発表者*）

2. Koichiro Matsumoto*, Kimitoshi Yamazaki, “Floor Surface Property Estimation based on Measurement of Hardness and Viscosity Using Wiping-motion and Separating-motion,” *Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation 2019*, pp. 2552 – 2558. (2019)

関連する主な国内会議発表（査読付き，発表者*）

3. 松本 廣一郎*, 山崎 公俊：“建物内探索ロボットのための表面状態推定に向けた払い動作による表面状態記述方法の実験的検討”，第 23 回ロボティクスシンポジウム，pp.227-230. (2018)

学位論文のテーマに直接関係しない国内会議発表（発表者*）

4. 松本廣一郎*, 山崎公俊：“遠隔操作ロボットによる被災建物調査のための払い動作を用いた床面の表面状態記述 —払い速度と動摩擦係数の関係性の記述—”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 講演番号 2A1-Q06. (2017)
5. 松本廣一郎*, 山崎公俊：“被災環境での走行可否判定に向けた払い動作に基づく表面状態記述のための基礎検討”，第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 講演番号 1M3-6. (2016)
6. 松本廣一郎*, 田代 治之, 山崎公俊：“テクスチャ特徴量を用いた瓦礫構成物種別に関する検討”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 講演番号 1A1-09b1. (2016)