

バーチャルリアリティ学ライブラリ

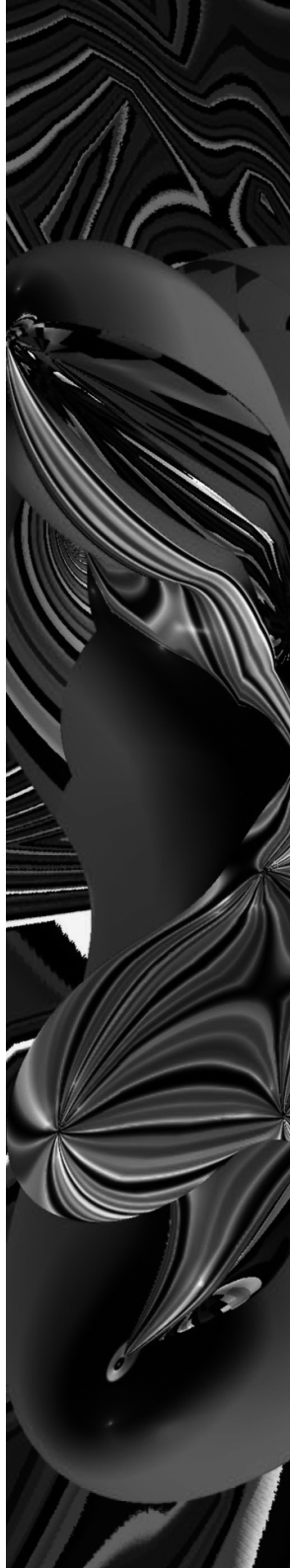
4

ハプティクス

日本バーチャルリアリティ学会 編

嵯峨 智, 吉元俊輔 編著

コロナ社



バーチャルリアリティ学ライブラリ出版委員会

委員長	清川 清	(奈良先端科学技術大学院大学, 博士 (工学))
副委員長	伊藤 雄一	(青山学院大学, 博士 (情報科学))
委員	北崎 充晃	(豊橋技術科学大学, 博士 (学術))
	青山 一真	(東京工科大学, 博士 (情報科学))
	山岡 潤一	(慶應義塾大学, 博士 (政策・メディア))
	嵯峨 智	(熊本大学, 博士 (情報理工学))
	吉元 俊輔	(大阪大学, 博士 (工学))
	高嶋 和毅	(芝浦工業大学, 博士 (情報科学))
	畑田 裕二	(東京大学, 博士 (学際情報学))
	古川 正紘	(大阪大学, 博士 (工学))

(2026 年 5 月現在)

編著者・著者一覧

編著者	嵯峨 智	まえがき, 10.1 節, 11 章, 18 章		
	吉元 俊輔	3 章, 8 章, 17 章		
著者	篠田 裕之	はしがき	仲谷 正史	1.1 節
	黒木 忍	1.2 節, 2.1 節, 2 章コラム	横坂 拓巳	2.2 ~ 2.3 節
	伴 祐樹	2.4 節	渡邊 淳司	2.5 節
	蜂須 拓	4 章, 4 章コラム	北田 亮	5 章
	岡本 正吾	6 章, 14.4 節, 9 章コラム	石塚 裕己	7 章, 9 章
	長谷川 晶一	10.2 節	梶本 裕之	10.3 節, 10 章コラム, 11 章, 14.3 節
	黒田嘉宏	10.4 節, 12.2 節	昆陽 雅司	11 章
	佐瀬一弥	12.1 節	田川 和義	12.3 節
	宇治土公 雄介	12.4 節	田辺 健	12.4 節, 20 章
	佐藤 克成	13 章	高崎 正也	14.1 節
	牧野 泰才	14.2 節	永野 光	15 章
	栗田 雄一	16 章, 21 章コラム	野々村 美宗	17 章
	桂 誠一郎	18 章	田中 由浩	18 章, 19 章
	竹中 幹雄	21 章		

刊行のことば

今日、バーチャルリアリティ（VR, virtual reality）は誰もが知り、多くの人々が使う技術となった。特に、ヘッドマウントディスプレイ（HMD, head mounted display）を用いたゲームやスマートフォン向けの360°動画などは広く普及しつつある。安価なHMDが普及し始めた2016年はいわゆる「VR元年」などと呼ばれ、2020年からのコロナ禍ではリモートで現実さながらの活動を支援するVR技術にさらに注目が集まった。現在では、医療、建築、製造、教育、観光、コミュニケーション、エンタテインメント、アートなど、さまざまな分野でVRの活用が進んでいる。VRは私たちの社会生活に少しずつ、かつ確実に浸透しつつあり、今後はメタバースのような社会基盤の基幹技術としてさらに重要度を高めていくと考えられている。

The American Heritage Dictionaryによれば、バーチャル（virtual）とは「みかけや形は現物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり現物であること」とされており、これがそのままVRの定義を与える。端的に言えば、VRとは「現実のエッセンス」である。すなわち、VRは人間のありとあらゆる感覚や体験、その記録、再生、伝達、変調などに関わるものである。一般にイメージされやすい「HMDを用いたリアルな視覚体験」は、きわめて広範なVRのごく一部を表現しているにすぎない。

日本バーチャルリアリティ学会は、黎明期のVRを育んだ研究者が中心となって「VR元年」のはるか20年前の1996年に発足した。以来、学問としてのVRは計算機科学、システム科学、生体工学、医学、認知心理学、芸術などの総合科学としてユニークな体系を築いてきた。学会発足から14年後の2010年に刊行された『バーチャルリアリティ学』は、当時の気鋭の研究者が総力を挙げて執筆したものである。同書では、VRの基礎から応用までを幅広く取り

扱っている。「トピックや研究事例は最新のものではないが、本質的あるいは効果としてはVRを学ぶこと」ができ、時代によって色褪せることのない「VRのエッセンス」が詰まっている。しかしながら、近年のVRの進展はあまりにも目覚ましく、『バーチャルリアリティ学』を補完し、最新のトピックや研究事例をより深く取り扱う書籍への要望が高まっていた。

「バーチャルリアリティ学ライブラリ」はそのような要望に応えることを目的として企画された。『バーチャルリアリティ学』のようにさまざまなトピックをコンパクトに一括して取り扱うのではなく、分冊ごとに特定のトピックについてより深く取り扱うスタイルとした。これにより、急速に発展し続けるVRの広範で詳細な内容をタイムリーかつ継続的に提供するという難題を、ある程度同時に解決することを意図している。今後、バーチャルリアリティ学ライブラリ出版委員会が選定したさまざまなテーマについて、そのテーマを代表する研究者に執筆いただいた分冊を順次刊行していく予定である。

くしくも『バーチャルリアリティ学』の刊行からちょうど再び14年が経過した2024年に、委員や著者、また学会の協力を得て「バーチャルリアリティ学ライブラリ」の刊行を開始できる運びとなった。今後さらにVR分野が発展していく様子をリアルタイムで理解する一助となり、VRに携わるすべての人々の羅針盤となることを願う。

2024年1月

清川 清

ま え が き

本書の目的は、高校生や大学生などをおもな対象とし、これらの人々が、ハプティクスという学問に初めてふれる上で必要となる知識を、関連文献へのリンクとともに、さまざまな観点から提供することである。

ハプティクスとは何か。この本を手にとっている皆さんは、ハプティクスとは何かをある程度知っているかもしれない。しかし、その定義は何かと聞かれて自信を持って答えられる人は少ない。1つの答えとして、「ハプティクス ≡ 触覚」という認識は間違っていない。ただ、触覚という言葉の定義自体が曖昧であること、ハプティクスの研究対象が徐々に裾野を広げていること、使われる文脈次第で定義が変わることから、厳密な線引きは難しい。

1つの基準として、本書でおもに取り扱う言葉を図1に示す。それぞれの言葉の詳しい定義は読者自身で再確認してほしいが、この図で伝えたいことは、ハプティクスという学問領域は、「感覚としての触覚」「技術としての触覚」の両方を包含しているということである。ハプティクスという言葉は、時に技術のみ、時に感覚のみを対象として使われるが、本書では、ハプティクスはこの双方が密接に繋がる横断的な学問領域であることを皆さんにお伝えしたい。

本書ではまず、第I部で「感覚としての触覚」を生理学・心理学的な側面から確認する。第II部は「技術としての触覚」のうち、おもにその計測手段について解説し、第III部では、おもに提示手段について扱う。そして第IV部では、ハプティクスの周辺領域までを幅広く捉え、応用事例を扱う。限られた紙面のため、すべてを深く紹介することは難しい。そのため、本書では、これまでの触覚研究を通じて今後10年に欠かせないと評価できる事例を厳選した。

なお、本書では図1にない「力覚」という言葉も使われる。これは、大きな意味での「触覚」を大まかに皮膚感覚と自己受容感覚に分けたときに使われる

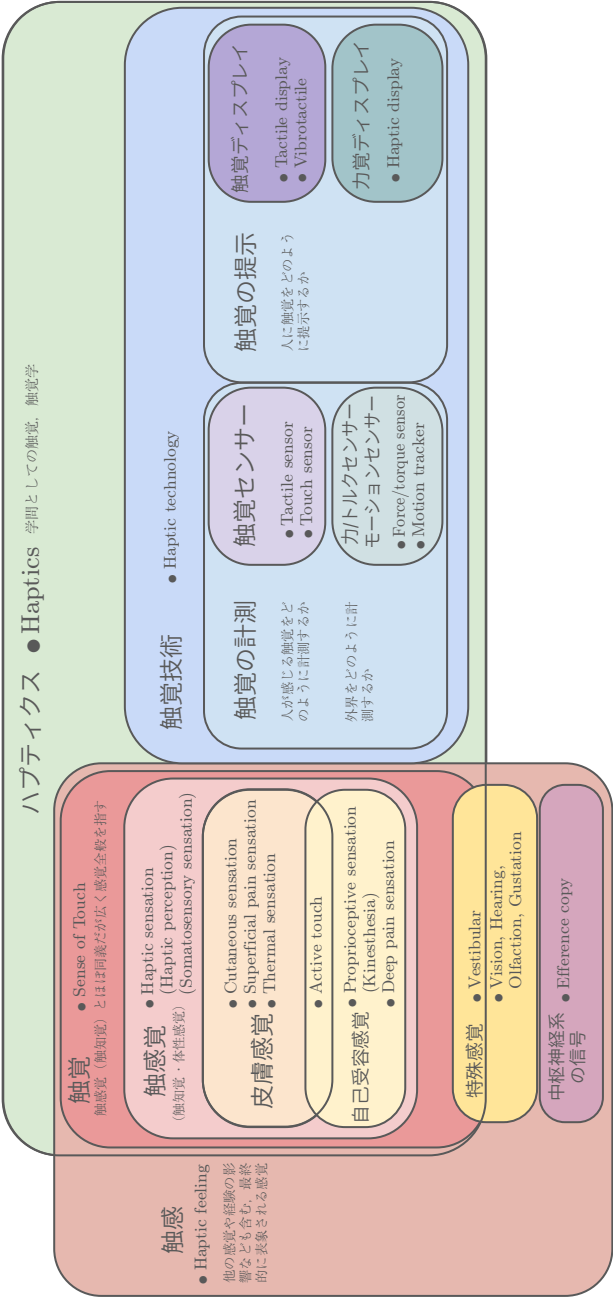


図 1 触覚に関連する言葉とその領域

言葉である。皮膚感覚由来の感覚を（狭い意味での）「触覚」と表現し、自己受容感覚由来の感覚を「力覚」と工学的に表現すること、そしてこの2つをあわせて「力触覚」と呼ぶ場合があることを覚えておいてほしい。

参考文献については、可能な限り原典へのリンクをデジタルオブジェクト識別子（DOI）として掲載している。電子書籍版ではクリック可能なリンクになっているので、あわせて活用してほしい。初学者にとって英語の文献を読むことは気後れするかもしれないが、研究の積み重ねが学問であることを肌で感じてもらう機会にしてほしい。閲覧に購読契約が必要なリンク先も多いが、概要を読んで少しでも研究の積み重ねの一端にふれ、より深く理解するための手がかりとしてもらえると幸いである。

2026 年 6 月

嵯峨 智

は し が き

ハプティクスは、触覚を理解・解明して応用する研究開発分野の呼称である。今世紀に入って専門の国際会議が開催されるようになったことで、その科学・技術・応用が一体となった分野として認識されるようになった。このようなハプティクスは、バーチャルリアリティの中でも特に今後の発展が期待される分野である。触覚の一般的な再現は視聴覚に比べてまだ難しく、現状で広く実用化されているのは振動や1自由度の力覚など、一部の感覚に限られている。しかし、触覚の知覚に対する科学的理解と、触覚を提示する基礎技術の両方が、この20年あまりで大きく進展した。当時は想像できなかったことも実現できるようになってきており、今後のブレークスルーがおおいに期待できる状況にある。

ハプティクスの知見は、バーチャルリアリティだけでなく、他の分野にも幅広く活用することができる。コンピューターと人とのインタフェースや、ロボットの触覚、コミュニケーション、製品デザイン、リハビリテーション、健康促進、医療など、関連分野は多岐にわたる。特に2010年以降は、スマートフォンや自動車内インタフェース、ゲームコントローラーの振動提示デバイスが普及した。その応用の裾野はさらに広がっており、産業的な影響力を持つようにもなった。また、現在、われわれの想像を上回る速度で人工知能（AI）が発展しているが、このAIの発展はハプティクスとも大きく関係している。決まった仕事しかできなかった従来のロボットが、高級な触覚を必要とすることはなかったが、ロボットが自分の判断で柔軟な仕事を行えるようになると、触覚がいよいよ重要になる。触覚を備えたAIロボットのインパクトは計り知れないが、われわれはまさにいまその入り口に立っているといえる。

ハプティクス研究がこのような状況にある中、熊本大学の嵯峨 智先生、大阪大学の吉元俊輔先生が中心となって本書がまとめられた。今世紀に入ってから

の研究成果を俯瞰し、時間が経過しても重要性の変わらない事項が厳選されている。今後さらに発展していくハプティクスの研究・開発を効率良く進めるために理解しておくべき必要かつ十分な知見が、一冊の読みものとして通読できる形でまとめられている。ハプティクスの教科書としてはこれまでにない画期的な書物になっている。本書が未来の世界を切り開く学生の皆さんや研究者・技術者の方々に幅広く読まれ、ハプティクスが力強く発展していくことを期待する。

2026 年 6 月

篠田裕之

目 次

第 I 部 触覚の基礎

第 1 章 生 理 学

1.1 皮膚感覚と自己受容感覚	2
1.1.1 皮 膚 感 覚	3
1.1.2 自己受容感覚	9
1.2 触覚を支える神経基盤	11
1.2.1 末梢から中枢へ	11
1.2.2 一次体性感覚野	12
1.2.3 二次体性感覚野	16
1.2.4 頭 頂 連 合 野	17
1.2.5 高 次 視 覚 野	18
1.2.6 感 情 的 触 覚	19

第 2 章 心 理 学

2.1 知 覚 特 性	20
2.1.1 皮膚変形の検出	20
2.1.2 空 間 分 解 能	22
2.1.3 温 度 の 知 覚	23

2.1.4	振動周波数知覚	24
2.1.5	粗 さ の 知 覚	25
2.1.6	テクスチャ知覚	25
2.1.7	2次元パターンの知覚	27
2.1.8	運 動 の 知 覚	27
2.2	アクティブタッチ	28
2.2.1	探索の手続き：判断したい触り心地に応じて変化する手指の動き	29
2.2.2	物体の触り心地に応じて変化する手指の動き	30
2.2.3	触り方が変わったときの触り心地への影響	31
2.2.4	われわれは触り方と触り心地の関係を知っている	32
2.3	触 覚 の 錯 覚	33
2.3.1	運 動 の 錯 覚	35
2.3.2	ふれた物体の距離・大きさの錯覚	39
2.3.3	形 状 の 錯 覚	42
2.3.4	材 質 感 の 錯 覚	49
2.3.5	重 さ の 錯 覚	51
2.3.6	自他区別の錯覚	52
2.4	クロスモーダル効果	55
2.4.1	クロスモーダル効果の基礎	56
2.4.2	代表的なクロスモーダル効果の特徴	58
2.4.3	神経科学的基盤	60
2.4.4	多感覚統合の数理モデル	62
2.4.5	触覚と他の感覚モダリティとの相互作用	63
2.4.6	クロスモーダル触覚の応用と展望	69
2.5	触 覚 の 言 葉	74
2.5.1	感覚や情動のカテゴリーと言葉	74
2.5.2	形容詞による触覚のカテゴリー化	75

2.5.3	オノマトペによる触覚の言葉の分布図	78
-------	-------------------	----

2.5.4	触覚の言葉による素材の配置	81
-------	---------------	----

コラム：	かき消される触感	84
------	----------	----

第 II 部 触覚の計測

第 3 章 計測法概論

3.1	力触覚情報の計測の目的	86
-----	-------------	----

3.2	力触覚情報の階層とさまざまな測り方	88
-----	-------------------	----

第 4 章 身体運動・物理刺激・性質の計測

4.1	力触覚に影響を及ぼす刺激	91
-----	--------------	----

4.2	機械刺激の運動学的計測	92
-----	-------------	----

4.2.1	変位	93
-------	----	----

4.2.2	速度・加速度	96
-------	--------	----

4.2.3	振動	96
-------	----	----

4.3	温冷刺激の計測	101
-----	---------	-----

4.4	機械特性の計測	103
-----	---------	-----

4.4.1	硬さの計測	103
-------	-------	-----

4.4.2	摩擦係数の計測	105
-------	---------	-----

コラム：	同じ物理刺激でも異なる感じ方？——社会と力触覚	106
------	-------------------------	-----

第 5 章 生理学実験と計測手法

5.1	実験計画と仮説	107
5.2	陽性対照と陰性対照	108
5.3	交 絡 要 因	110
5.4	被験者内要因と被験者間要因	111
5.5	従属変数と独立変数	112
5.6	実験参加者の選定	113
5.7	事前登録と再現性の危機	115
5.8	倫 理 委 員 会	116
5.9	計 測 方 法	116
5.9.1	脳と脳機能イメージング	116
5.9.2	ベルベットハンド錯覚に関わる脳内ネットワーク	119
5.9.3	末梢の活動の計測	120

第 6 章 知覚特性の測定・心理物理測定法

6.1	主観的等価点, 弁別閾と検出閾	122
6.2	古典的な心理物理測定法	124
6.2.1	恒 常 法	124
6.2.2	極 限 法	127
6.2.3	調 整 法	129
6.3	適応的な心理物理測定法：階段法	130
6.4	感覚の数量化・尺度化	131
6.4.1	感 覚 量	131
6.4.2	マグニチュード推定法	132
6.4.3	SD 法	134

第 7 章 物理モデリング

7.1 生体の物理モデリング	137
7.2 皮膚シミュレーション	138
7.2.1 皮膚シミュレーションの概要	138
7.2.2 皮膚を平面形状と仮定した物理モデル	139
7.2.3 皮膚の形状を再現した物理モデル	140
7.2.4 皮膚シミュレーションの応用事例	143
7.3 機械受容器シミュレーション	143
7.3.1 機械受容器シミュレーションの概要	143
7.3.2 機械受容器の物理モデル	144
7.4 皮膚-機械受容器シミュレーション	146

第 8 章 セ ン サ ー

8.1 力触覚センサーの基礎	148
8.1.1 検出する物理量	148
8.1.2 主要な検出原理	150
8.1.3 特性とその評価	153
8.1.4 人の特性と触覚センサー	156
8.1.5 空間分布計測方法	157
8.1.6 センサーを構成する材料	158
8.2 さまざまな力触覚センサー	160
8.2.1 検出原理ごとの事例と原理の比較	160
8.2.2 検出対象ごとの事例	164

第 9 章 触覚理解のための信号処理

9.1 生体と機械の触覚信号処理	166
9.2 ハードウェアレベルでの信号処理	167
9.3 ソフトウェアレベルでの信号分析	168
9.3.1 周波数情報に基づく信号分析	168
9.3.2 機械学習に基づく信号分析	169
コラム：点字ブロックの発明者・三宅精一氏	171

第 III 部 触覚の提示

第 10 章 提示法概論

10.1 力触覚情報の提示の目的	173
10.2 力触覚の機能と提示	175
10.2.1 手の機能と触覚	175
10.2.2 触覚, アクティブタッチ, 把持操作とハプティクス	177
10.2.3 身体図式の認識と触覚	178
10.2.4 手への力触覚提示の研究史	178
10.2.5 足の機能と触覚	179
10.2.6 音 と 触 覚	179
10.2.7 感情的触覚とソーシャルタッチ	180
10.3 力触覚提示の階層構造	180
10.4 刺激の作り方	183
10.4.1 対 象 ベ ー ス	183

10.4.2	数理モデルベース	184
10.4.3	記録ベース	185
コラム	：触覚ディスプレイと力覚ディスプレイ	187

第 11 章 振 動 刺 激

11.1	振動提示デバイス	188
11.1.1	振動アクチュエーターの種類	188
11.1.2	振動提示の身体部位	192
11.2	振動レンダリングのアプローチ	194
11.2.1	数理モデルベースの振動レンダリング	194
11.2.2	記録ベースの振動レンダリング	195
11.2.3	知覚ベースの振動レンダリング	195
11.3	目的別の振動レンダリング手法	198
11.3.1	振動パターンの提示と識別性	198
11.3.2	衝 突 感	199
11.3.3	ク リ ッ ク 感	201
11.3.4	テクスチャ感	202
11.4	振動による臨場感・没入感の表現	204
11.4.1	音響信号に基づく振動生成技術	205
11.4.2	振動の空間表現技術	206

第 12 章 力 覚

12.1	力覚提示デバイス	210
12.1.1	力覚提示デバイスとは	210
12.1.2	接 地 型	212

12.1.3 装 着 型	215
12.1.4 非 接 地 型	217
12.1.5 遭 遇 型	217
12.1.6 その他のアプローチ	218
12.1.7 低コスト化・軽量化に向けて	218
12.2 レンダリング手法	219
12.2.1 干 渉 計 算	220
12.2.2 物 体 表 現	222
12.2.3 デバイスの制約を考慮した設計法	223
12.3 リーダー・フォロワー制御とバイラテラル制御	223
12.3.1 リーダー・フォロワー制御とは	223
12.3.2 基本的なバイラテラル制御	225
12.3.3 改良されたバイラテラル制御	228
12.4 疑 似 力 覚	229
12.4.1 疑似力覚とは	229
12.4.2 限 定 型	230
12.4.3 代 替 型	232
12.4.4 疑似力覚提示手法の問題	234

第 13 章 温度感覚の提示

13.1 温度感覚の提示方法	235
13.1.1 皮膚温度を変化させる手法：接触式	236
13.1.2 皮膚温度を変化させる手法：非接触式	238
13.1.3 皮膚温度を変化させない手法	238
13.2 温度感覚の計測・レンダリング	239
13.2.1 温度計測手法	239

13.2.2	温度変化の算出	240
13.3	温度感覚提示の注意点	240

第 14 章 新しい触覚の提示手法

14.1	サーフェスハプティクス	242
14.1.1	サーフェスハプティクスとは	242
14.1.2	静電気力による方法	243
14.1.3	たわみ振動による方法	246
14.1.4	縦振動による方法	249
14.1.5	弾性表面波による方法	251
14.2	超音波による空中ハプティクス	252
14.2.1	超音波による遠隔触覚提示	252
14.2.2	基本原理と単一焦点の特性	253
14.2.3	超音波提示デバイス	257
14.2.4	変調による感度の向上	258
14.2.5	空中映像への触覚提示	259
14.2.6	その他の触覚提示応用	259
14.3	神経刺激ハプティクス	260
14.3.1	神経電気刺激	261
14.3.2	神経刺激による触覚提示	262
14.3.3	神経刺激による力覚提示	265
14.4	硬軟感・やわらかさ感レンダリングと提示デバイス	267
14.4.1	やわらかさの知覚機序	267
14.4.2	CASR 仮説に基づくやわらかさの提示手法	269

第 IV 部 触覚の応用

第 15 章 応用 概 論

15.1 応用の対象である力覚，触覚，触感の違い	273
15.2 応用における「目的」への着目	274
15.3 「目的」に基づく応用の分類	274

第 16 章 触感を設計する

16.1 プロダクトの触感	276
16.2 触感の設計技術	277
16.2.1 触感のデジタルデザイン	277
16.2.2 触感の評価・生成技術	278
16.3 触感設計の事例	280
16.3.1 触感のデジタルデザイン事例	280
16.3.2 運動感覚のデジタルデザイン事例	281

第 17 章 触感を評価する

17.1 触感の官能評価と物理評価	283
17.2 従来の物理的評価手法	284
17.2.1 摩擦試験機型	284
17.2.2 指モデル接触子	285

17.2.3	ポータブル型	286
17.2.4	指装着型・フォースプレート型	287
17.2.5	圧縮型	289
17.3	進化する触感評価システム	289
17.3.1	力触覚刺激を捉える汎用センサー	290
17.3.2	接触の分布を捉える汎用センサー	290
17.3.3	ロボット用の触覚センサー	291

第 18 章 触感を伝える

18.1	触 感 の 伝 送	292
18.1.1	触覚の三原色	293
18.1.2	触覚の双方向性の活用	293
18.1.3	触覚伝送のアレンジ	295
18.2	触覚の伝送の応用例	295
18.2.1	触覚の記録と再現	295
18.2.2	触 覚 の 共 有	296

第 19 章 触感を変容する

19.1	複合的な触感	299
19.2	環 境 型	300
19.3	外 部 支 援 型	300
19.3.1	アシストタイプ	300
19.3.2	介在タイプ	301
19.4	ウェアラブル型	302
19.4.1	刺 激 追 加	302

19.4.2 皮膚特性変化	303
19.5 クロスモーダル型	304
19.6 触覚の変容手法の課題と応用性	305

第 20 章 触覚で代行する

20.1 感覚代行の歴史	306
20.2 視覚の代行	307
20.3 聴覚の代行	309
20.4 身体の代行	310

第 21 章 触覚をエンタテインメントにする

21.1 静的活動：“見る・聴く”事例	313
21.1.1 ウェアラブルハプティクス Hapbeat	313
21.1.2 iPhone	313
21.1.3 D-BOX の家庭向けハプティックシート	314
21.1.4 Haptic Vest	314
21.1.5 Newcastle FC sensory shirts	314
21.1.6 VR アニメーション「Beat」	315
21.1.7 Powersoft Haptic Tech	315
21.2 静的活動：“遊ぶ”事例	315
21.2.1 PS5 DualSense コントローラー	315
21.2.2 全身触覚再現デバイス「TactSuit Pro」	316
21.2.3 ハプティックゲーミングクッション「Razer Freyja」	316
21.2.4 グローブ型ハプティックデバイス	317

21.2.5	Sandbox VR における触覚技術の活用	317
21.2.6	ゲームセンターにおける触覚技術の活用	317
21.2.7	テーマパークにおける触覚技術の活用	318
21.3	動的活動：“巡る”事例	318
21.3.1	車載ハプティック音楽	318
21.3.2	完全非装着触覚技術「Haptic Floor」	319
21.3.3	電通デジタル「超さわれる美術館」	320
21.3.4	風ハプティクス	320
21.4	エンタメ領域への触覚技術応用の可能性	321
	コラム：ハプティクスのマーケットと ELSI	322
	引用・参考文献	323
索 引		361

カラー画像

以下よりカラー図面がダウンロード可能です。

<https://www.coronasha.co.jp/static/02694/color.pdf>



第Ⅰ部 触覚の基礎

第Ⅰ部では、触覚の基礎として、触知覚が生じる生理学・心理学的な機構、およびその特性や記述方法について概説する。ふれるということは日頃あまり意識されないが、布の素材をさっと見分けたり、かすかな振動を捉えたりする能力は驚くほど精緻である。皮膚には複数の触覚受容器が存在する。触覚受容器は、物理的な変形を検知する「機械受容器」、温度変化を検知する「温度受容器」、組織損傷を検知する「痛覚受容器」に大別される。本書では、ハプティクス研究において中心的な役割を果たす機械受容器を中心に解説するが、湿り気のように直接の受容器がない感覚についても、温度や圧力といった複数の手がかりを脳内で統合することで知覚できる。さらに、視覚に錯視があるように触覚にも興味深い錯覚があり、時には見た目や音が触感の印象を変えてしまうこともある。こうした一見捉えどころのない触感の記述方法としては、物理的な計測や心理物理的な方法が用いられ、形容詞やオノマトペを用いて評価する試みも存在する。ハプティクスをどのように利用し、どのように評価・応用するかを具体的に考える上で、まずはその前提となる触知覚の科学的な理解にふれてみてほしい。

第1章 生理学

ハプティクス

われわれは触覚を通じて世界を認識している。日常ではあまり意識されないが、触覚がもたらす情報は想像以上に多様である。本章では触覚の基礎的な生成機序に焦点を当て、まず皮膚感覚と自己受容感覚を取り上げる。続いて、これらの触覚情報を支える神経基盤を末梢から中枢へと順にたどって紹介する。

1.1 皮膚感覚と自己受容感覚

何かにふれ、その触り心地を感じるということをわれわれはつねに経験している。その一方で、日常の中で、ふれることを意識することはほとんどない。むしろ、全身の皮膚から受け取る触覚情報を逐一気にしていたら、何も行動することができないかもしれない。

しかし、われわれが目を閉じたときに、触覚なしではコップを安定につかむことや、立つこと、歩くことができなくなってしまう。自分がいまここに存在するという実感を持つことも難しくなってしまうかもしれない。この意味で、触覚はわれわれが生きていく上で欠かせない感覚である^{1)†1}。

ここで述べている触覚は、自らの動作によって感じる感覚であり、体性感覚とも呼ばれる。体性感覚は、**皮膚感覚** (cutaneous sensation) と **自己受容感覚** (proprioceptive sensation)^{†2}に分けることができる。そして、皮膚感覚と自己受容感覚はそれぞれ、皮膚における触覚と、筋・腱・関節における触覚に分解

^{†1} 肩付数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

^{†2} 固有受容感覚とも表現する。

して理解することができる。後者の自己受容感覚は特に、身体動作によって発生する感覚シグナルである。

1.1.1 皮膚感覚

皮膚感覚は力（機械刺激）によって皮膚が変形することで生じる。皮膚には大きく分けて5種類の生体触覚センサーがある。生体触覚センサーは、感覚神経と、それに付随する神経終末によって構成される。感覚神経の中にも、直径が大きく太いものと、直径が小さく細いものがある。そのうち最も細い感覚神経で、皮膚の中でも表皮の層にまで入り込む感覚神経は自由神経終末と呼ばれている。この自由神経終末は、皮膚変形による機械刺激だけでなく、化学物質や温度など多様な刺激を受容して、中枢神経系に皮膚感覚情報を伝えている。

皮膚は、毛の生えている有毛部と、生えていない無毛部に分けることができる。無毛部の代表例が、手足の指先である。無毛部の**自由神経終末**は、温度、痛み、かゆみといった皮膚感覚を担う。しかし、自由神経終末だけではふれた対象物の形状や質感は伝達しきれない。自由神経終末と比較して太い感覚神経が、ふれた対象物の形状や質感を知るために必要となる。

太い感覚神経^{†1}は、自由神経終末と比較して、情報が伝達する速度が速い。伝達速度が速いことで、とっさの動作、例えば持とうとしたコップが指先からすべり落ちてしまう状況に対応できる。また、対象物の硬さや表面粗さなどの情報についても、手でふれた瞬間に知ることができる。

皮膚感覚から認識できる情報は、振動、圧力、温度^{†2}の3つが挙げられる。振動と圧力を検出する感覚神経の先端には、神経終末器官と呼ばれる構造体が接続している。皮膚感覚の神経終末器官は4種類あることがわかっている（図1.1）。この神経終末器官が皮膚に加えられた機械刺激を選択的に検出したり、微細な変形を増幅したりすることで、繊細な皮膚感覚が生成される。皮膚上の圧力を検出する終末器官は2種類あって、それぞれ**マイスナー小体**（Meissner

^{†1} 有髄神経と呼ぶ。

^{†2} 温度については13章で解説する。

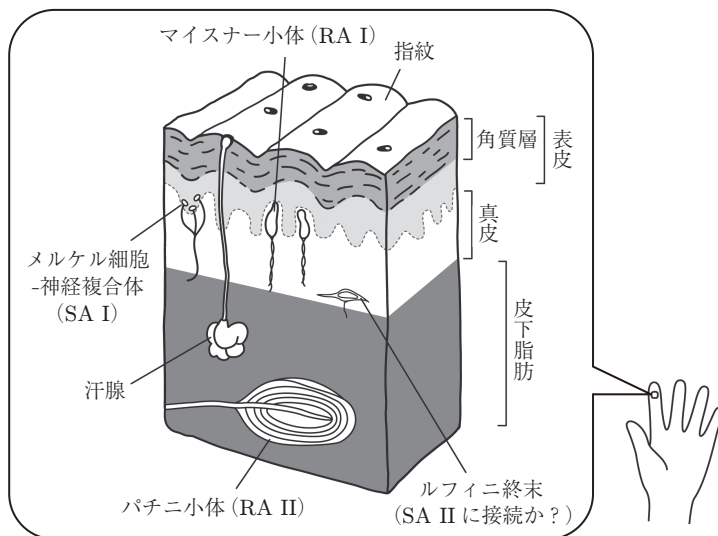


図 1.1 皮膚感覚を司る感覚神経と神経終末器官：指腹部に存在する機械受容器の配置

corpuscle) とパチニ小体 (Pacinian corpuscle) と呼ぶ。また、振動を検出する終末器官も 2 種類あり、メルケル細胞 (Merkel cell) とルフィニ終末 (Ruffini ending) と呼ぶ。

機械刺激は振動と圧力に分類され、これらの機械刺激に対して、感覚神経の応答は 2 種類に分解することができる。1 つ目は、刺激を加えた直後の応答（ダイナミック応答）であり、2 つ目は刺激を加え続けた際の応答（スタティック応答）である。機械刺激に対する応答の仕方では、感覚神経を分類することが神経生理学では慣例になっている。

皮膚に機械刺激を加えたとき、感覚神経は神経インパルスを応答として示す。この神経インパルス応答のうち、ダイナミック応答を示しスタティック応答を示さない感覚神経は、**速順応性神経** (RA, rapidly adapting afferent)[†]に分類される。一方で、ダイナミック応答・スタティック応答の両方を示す感覚神経

[†] **fast adapting** (FA) とも表現される。人中心の応用研究 (Haptics, Human Factors, Neuroengineering) においては FA と呼称することも多い。

は、**遅順応性神経**（SA, slowly adapting afferent）に分類される。この神経分類に加えて、機械刺激に対して応答する面（受容野と呼ぶ）の面積によって、タイプ I（受容野の面積が小さい、数十 mm^2 ）、タイプ II（受容野の面積が大きい、RA II は数百 mm^2 程度、SA II は 60 mm^2 程度）に分類される。

1800 年代後半からの神経解剖学と神経生理学の研究知見より、マイスナー小体とパチニ小体は RA 感覚神経に接続していて、受容野サイズの大小からそれぞれ RA I, RA II 感覚神経と呼ばれている。これらの感覚神経は、振動の情報を伝達する。メルケル細胞とルフィニ終末は SA 感覚神経に接続していて、こちらも受容野サイズの大小によりそれぞれ SA I, SA II 感覚神経と呼ばれている[†]（図 1.2。それぞれの機械振動周波数に対する応答性は図 2.1 を参照）。これらの感覚神経は、圧力の情報を伝達する。

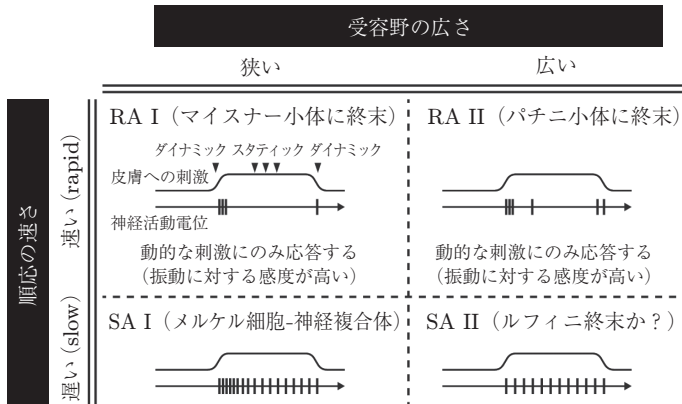


図 1.2 機械受容器に接続する求心性神経応答の違い

〔1〕 感覚神経における機械刺激の検出原理

皮膚感覚を説明する末梢神経科学では、長い間、触覚の感覚神経末端に存在する終末器官（メルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体、ルフィニ終末）

[†] 人の有毛部では上記のような接続が確認されている一方で、無毛部においては、SA II 的な応答特性を示す神経線維は存在するものの、その解剖学的実体としてのルフィニ終末の存在については、いまだ決定的な証拠が得られていないという点に注意が必要である^{2),3)}。

索引

【あ】	
アクティブタッチ	29, 176
圧電効果式	151, 162
圧 力	92
アドミッタンス型	184, 215
穴の大きさの錯覚	41
粗さ感	203
アリストテレスの錯覚	46
アレイ型	157

【い】	
閾 値	145
位置検出素子	152
一次体性感覚野	12
一過性受容体電位	23
陰極刺激	263
陰性対照	109
インピーダンス型	
	104, 184, 215

【う】	
上側弁別閾	125
ウェーバーの距離の錯覚	40
ウェーバーの法則	22
ウェーブレット変換	168
運 動	148
— の状態	148
運動感覚	281
運動錯覚	232
運動残効	27
運動量	92, 148

【え】	
エグゾスケルトン型	215
遠心性コピー	176, 178

【お】	
凹凸因子	283
凹凸感	203
応 力	92, 148
大きさ-重さの錯覚	51
音 式	152, 163
オノマトペ	78
音響インピーダンス	255
音響放射圧	255
温 度	92, 148
— の指間参照現象	49
温度覚センサー	149
温度感受性一過性受容体	
電位型 (TRP) チャネル	238
温度受容器	23, 138
温冷因子	283
温冷感	203

【か】	
解像度	94
階段法	130
回転する砂時計の錯覚	43
回転ディスクの伸長錯覚	44
化学的な作用因子	185
化学薬品	261
角運動量	148
角加速度	148
角質層	138
角速度	148

角変位	148
仮現運動	35
下降系列	128
加速度	92, 96, 148
硬さ覚センサー	149
カップパ効果	36
感覚間協応	56
感覚減衰	54
間隔尺度	132
感覚代行	262, 306
感覚と運動の協調	30
感覚抑制	54
感覚量	131
感覚漏斗現象	38
環 境	148
感情的触覚	19, 180
慣性モーメント	92, 148
関節受容器	10

【き】	
機械刺激	3
機械受容器	138
疑似力覚	229
共感覚	56
極限法	127
極 性	263
魚骨触錯覚	9, 44
記録ベース	185
近接覚センサー	149
筋電図	120

【く】	
空間解像度	94
空間加算	21

空間特性 155
 空中ハプティクス 252
 クロスモーダル効果 55
 クーロン摩擦 221

【け】

形 状 92
 形容詞の評価語対 75
 牽引力錯覚 232
 検出閾 124
 減衰係数 267
 限定型 230
 腱紡錘 10

【こ】

恒常法 124
 校 正 153
 較 正 153
 硬軟因子 283
 硬軟感 203
 交絡要因 110
 固有受容感覚 2
 固有振動数 92
 ゴルジ臓器官 10

【さ】

材質-重さの錯覚 52
 錯 覚 33
 サーフェスハプティクス 242
 サーマルグリル錯覚 24, 51, 241
 サーマルリファラル 49
 参加者内要因 111
 参照刺激 124

【し】

時間解像度 94
 時間加算 21
 磁気コイル 261
 磁気式 152, 163
 磁気抵抗効果素子 152
 識別的触覚 19, 180
 ジグザグ舌錯覚 48

シグモイド 144
 試験刺激 124
 自己受容感覚 2, 48, 138, 176, 210, 267, 273
 下側弁別閾 125
 湿 度 148
 質 量 92, 148
 シボ加工 277
 湿り感の指間参照現象 49
 尺度水準 132
 シャルパンティエ効果 51, 64
 自由神経終末 3
 従属変数 112
 周波数特性 155
 主観的等価点 122
 主成分分析 169
 受容野 13
 順序尺度 132
 順 応 27
 上下法 129
 上昇系列 128
 触圧覚センサー 149
 触原色原理 293
 触 覚 273
 —の三原色 293
 触 感 273
 シリアルリンク機構 214
 神経刺激 260
 神経電気刺激 261
 信号対雑音比 153
 深層ニューラルネット
 ワークモデル 137
 身体所有感の錯覚 53
 身体のリックモデル 137
 心電図 120
 振 動 148
 真 皮 138
 真皮乳頭 143
 心理物理曲線 125
 心理物理測定法 122

【す】

水平方向の力に基づく
 凹凸錯覚 48
 数理モデルベース 184
 スクイーズ効果 259
 スクイーズ膜 246
 スティーヴンスのべき法則 133, 134, 207
 スティックスリップ現象 105, 203, 204
 すべり覚センサー 149

【せ】

静電気力 244
 静電容量式 151, 161
 積分発火モデル 145
 接 触 148
 接触面積 92, 268
 絶対閾値 124
 接 地 211
 接地型 211
 ゼーバック効果 239
 線形弾性体 142

【そ】

遭遇型 182, 211, 217
 装着型 182, 211, 215
 速順応性神経 4
 速 度 96, 148

【た】

対称型 225
 対象ベース 183
 体性感覚野 182
 代替型 232
 タウ効果 35
 唾 液 121
 多感覚統合 57
 多次元尺度構成法 76
 探索の手続き 29
 弾性係数 148
 弾性表面波 251

弾性率 92

【ち】

力 92, 148

力帰還型 227

力逆送型 226

遅順応性神経 5

超音波振動 246

超音波フェーズドアレイ 253

調整法 129

丁度可知差異 123

【て】

抵抗式 151, 160

電気インピーダンス 262, 286

電気インピーダンス

トモグラフィ 158

電気刺激 260

電気的な作用因子 185

電磁雑音 153

電場解析 143

【と】

瞳孔径 121

独立変数 112

トモグラフィ型 158

努力感 282

トルク 92, 148

【に】

二次体性感覚野 16

二者強制選択課題 123

二点弁別閾 22

入出力特性 153

【ね】

ねじれ唇の錯覚 47

熱雑音 153

熱的な作用因子 185

熱伝導率 92

粘性係数 148

粘 度 92

【の】

脳磁図 117

脳 波 117

【は】

バイラテラル制御 224

把 持 176

把持型 182

パチニ小体 4, 144, 192, 309

ばね定数 267

パラレルリンク機構 214

パラレルワイヤー駆動 214

ハンドヘルド型 217

【ひ】

ピエゾ型アクチュエーター

189

皮下脂肪 138

光 式 152, 162

光ファイバブラッグ

グレーティング 152

被験者間要因 111

被験者内要因 111

ヒステリシス特性 154

ひずみ 92, 148

ひずみゲージ 153

非接地型 211, 217

皮膚癩 37

皮膚温度 121

皮膚感覚 2, 267, 273

皮膚感覚ディスプレイ

243, 244

皮膚電気活動 121

標準刺激 124

表 皮 138

表面粗さ 92

【ふ】

ファントムセンセーション 38

不応期 145

不関電極 263

腹話術効果 57

物 性 148

物性値 142

物理刺激 92

フーリエ変換 168

フリッカーノイズ 153

プロキシ手法 221

プロビット法 126

【へ】

平均摩擦係数 284

ベナルティー法 220

ベルチェ効果 236

ベルチェ素子 236

ヘルツの接触理論 289

ベルベットハンド錯覚

50, 108

変 位 92, 93, 144, 148

偏心モーター 188

弁別閾 123

【ほ】

ボアソン比 92, 148

ポリジメチルシロキサン 159

ホール素子 152

【ま】

マイスナー小体 3, 144

マガーク効果 58

膜時定数 145

膜抵抗 145

膜電位 145

マグニチュード推定法 132

摩擦因子 283

摩擦解析 143

摩擦感 203

摩擦係数 92, 148

— の平均偏差 285

摩擦三角錐 221

摩擦試験機 284

摩擦帯電型ナノ発電機 159

マスター・スレーブ制御 223

マトリクス型 158

【み】		誘導電流	261	力学的な作用因子	185
密 度	92	ユニラテラル制御	224	力学モデル	137
密度-重さの錯覚	52	指の麻痺錯覚	53	リーダー・フォロワー制御	223
【め】		指モデル接触子	285	リッジ/トラフ錯覚	45
メカノトランスダクション	6	【よ】		リニア共振アクチュエーター	188
メルケル細胞	4, 144	陽極刺激	263	流体圧式	153, 163
【も】		陽性対照	109	倫理委員会	116
モジュラス	132	羊皮紙錯覚	65	【る】	
漏れ積分発火モデル	145	【ら】		ルフィニ終末	4, 147
モンテカルロ法	169	ラバーハンド錯覚	52	【れ】	
【ゆ】		【り】		連成解析	143
有限要素法解析	140	力 覚	273		
		力覚提示デバイス	210		

【A】		【E】		【G】	
active touch	29	E-Skin	159	God object 手法	221
adaptation	27	E-textile	159	【H】	
affective touch	19	effERENCE copy	178	haptic primary colors	293
AM 法	258	EIT	158	HARKing	115
amplitude modulation	258	electrical impedance	158	Hodgkin-Huxley モデル	145
A α 線維	11	tomography	158	【I】	
A α fiber	11	electrocardiogram	120	integrate-and-fire model	145
A β 線維	11	electrodermal activity	121	Intensity Segment Modu-	
A β fiber	11	electromyogram	120	lation	197
【C】		ERM	188	ISM	197
C 線維	11	exploratory procedure	29, 176	【K】	
C fiber	11, 180	【F】		k-means 法	169
CASR 仮説	268	fast adapting	4	kinesthesia	281
Charpentier effect	51	FBG	152	【L】	
contact area spread rate		fiber Bragg grating	152	lateral modulation	258
hypothesis	268	fishbone tactile illusion	9	LM 法	258
cutaneous sensation	2	fMRI	117	LRA	189
【D】		fNIRS	117		
discriminative touch	19	frictional cone	221		

[M]		point of subjective equality	spatio-temporal modulation
magnitude estimation		122	258
method	132	poly dimethylpolysiloxane	staircase method
MDS 法	76	159	130
mean coefficient of friction		position sensitive detector	Stevens' power law
	285	152	133
mean deviation of coefficient of friction	285	prehension	S1
mechanotransduction	6	176	12
MEG	117	proprioceptive sensation	S2
Meissner corpuscle	3	2	16
Merkel cell	4	PSD	
method of adjustment	129	152	[T]
method of constant stimuli	124	Pseudo-haptics	TENG
		64, 233	159
method of limits	127	pupil size	thermal grill illusion
midair haptics	252	121	24
MIU	285		transient receptor potential
MMD	285		23
motion aftereffect	27	[Q]	triboelectric nanogenerator
		Q 学習	160
[P]			TRP
Pacinian corpuscle	4	[R]	23
parchment-skin illusion	65	rapidly adapting afferent	two-alternative forced
PDMS	159	4	choice task
PET	117	Ruffini ending	123
phantom sensation	38		two-point threshold
		[S]	22
		saliva	[U]
		121	up-down method
		SD 法	129
		76, 135	
		semantic differential	[W]
		method	Weber's law
		135	22
		sense of effort	~~~~~
		282	
		skin temperature	2AFC 課題
		121	123
		slowly adapting afferent	
		5	
		SN 比	
		154	

—編著者・著者略歴—

嵯峨 智（さが さとし）

- 2007 年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士後期課程修了（システム情報学専攻），
博士（情報理工学）
2017 年 熊本大学准教授，現在に至る

吉元 俊輔（よしもと しゅんすけ）

- 2012 年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了（機能創成専攻），博士（工学）
2024 年 大阪大学准教授，現在に至る

篠田 裕之（しのだ ひろゆき）

- 1990 年 東京大学大学院修士課程修了（計数工学専攻）
1995 年 博士（工学）（東京大学）
2012 年 東京大学教授，現在に至る

仲谷 正史（なかたに まさし）

- 2008 年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了（システム情報学），
博士（情報理工学）
2017 年 慶應義塾大学准教授，現在に至る

黒木 忍（くろき しのぶ）

- 2011 年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了（システム情報学），
博士（情報理工学）
2011 年 NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所，現在に至る

横坂 拓巳（よこさか たくみ）

- 2018 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科後期博士課程修了（物理情報システム専攻），
博士（学術）
2013 年 NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所，現在に至る

伴 祐樹（ばん ゆうき）

- 2016 年 東京大学大学院情報理工学系研究科後期博士課程修了（知能機械情報学専攻），
博士（情報理工学）
2025 年 東京大学特任准教授，現在に至る

渡邊 淳司（わたなべ じゅんじ）

- 2005 年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了（システム情報学専攻），
博士（情報理工学）
2013 年 NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所，現在に至る

蜂須 拓（はちす たく）

- 2015 年 電気通信大学大学院情報理工学研究科博士後期課程修了（総合情報学専攻），
博士（工学）
2026 年 筑波大学准教授，現在に至る

北田 亮（きただ りょう）

2005 年 京都大学大学院人間・環境学研究科博士課程修了（人間・環境学専攻専攻），
博士（人間・環境学）

2023 年 神戸大学教授，現在に至る

岡本 正吾（おかもと しょうご）

2010 年 東北大学大学院情報科学研究科博士課程後期 3 年の課程修了（応用情報科学専攻），
博士（情報科学）

2024 年 東京都立大学教授，現在に至る

石塚 裕己（いしづか ひろき）

2016 年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了（総合デザイン工学専攻），
博士（工学）

2026 年 上智大学准教授，現在に至る

長谷川 晶一（はせがわ しょういち）

1999 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了（知能システム科学専攻）

2006 年 博士（工学）（東京工業大学）

2010 年 東京工業大学（現 東京科学大学）准教授，現在に至る

梶本 裕之（かじもと ひろゆき）

2003 年 東京大学大学院情報理工学系研究科後期博士課程退学（システム情報学専攻）

2004 年 博士（情報理工学）（東京大学）

2018 年 電気通信大学教授，現在に至る

黒田 嘉宏（くろだ よしひろ）

2005 年 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了（社会情報学専攻），博士（情報学）

2019 年 筑波大学教授，現在に至る

昆陽 雅司（こんよう まさし）

2004 年 神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了（システム機能科学専攻），博士（工学）

2024 年 東北大学教授，現在に至る

佐瀬 一弥（させ かずや）

2017 年 北海道大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了（システム情報科学専攻），
博士（工学）

2020 年 東北学院大学准教授，現在に至る

田川 和義（たがわ かずよし）

2003 年 岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程修了（電子情報システム工学専攻），
博士（工学）

2023 年 富山県立大学教授，現在に至る

宇治土公 雄介（うじとこ ゆうすけ）

2020 年 電気通信大学大学院情報理工学研究科博士課程修了（情報学専攻），博士（工学）

2020 年 NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所，現在に至る

田辺 健（たなべ たけし）

2019 年 筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程修了（知能機能システム専攻）、博士（工学）

2019 年 産業技術総合研究所，現在に至る

佐藤 克成（さとう かつなり）

2011 年 東京大学大学院情報理工学系研究科後期博士課程修了（システム情報学専攻）、博士（情報理工学）

2021 年 奈良女子大学准教授，現在に至る

高崎 正也（たかさき まさや）

2001 年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（精密機械工学専攻），博士（工学）

2012 年 埼玉大学教授，現在に至る

牧野 泰才（まきの やすとし）

2007 年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了（システム情報学専攻）、博士（情報理工学）

2017 年 東京大学准教授，現在に至る

永野 光（ながの ひかる）

2015 年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了（機械理工学専攻），博士（工学）

2024 年 京都工芸繊維大学准教授，現在に至る

栗田 雄一（くりた ゆういち）

2004 年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了，博士（工学）

2018 年 広島大学教授，現在に至る

野々村 美宗（ののむら よしむね）

1996 年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士後期課程修了（応用化学専攻），博士（工学）

2017 年 山形大学教授，現在に至る

桂 誠一郎（かつら せいいちろう）

2004 年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士後期課程修了（総合デザイン工学専攻）、博士（工学）

2019 年 慶應義塾大学教授，現在に至る

田中 由浩（たなか よしひろ）

2006 年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了（バイオロボティクス専攻）、博士（工学）

2021 年 名古屋工業大学教授，現在に至る

竹中 幹雄（たけなか みきお）

修士（工学）

1990 年 ソニー株式会社入社

2019 年 ソニー中国研究院院長，現在に至る

ハプティクス (バーチャルリアリティ学ライブラリ 4)

Haptics

© 特定非営利活動法人 日本バーチャルリアリティ学会 2026

2026 年 8 月 21 日 初版第 1 刷発行



検印省略

編 者	特定非営利活動法人 日本バーチャルリアリティ学会
編 著 者	嵯 峨 智 吉 元 俊 輔
発 行 者	株式会社 コロナ社
代 表 者	牛 来 真 也
印 刷 所	三 美 印 刷 株 式 有 限 公 司
製 本 所	株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02694-8 C3355 Printed in Japan

(新宅)



 <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。