

## 触力覚による柔らかさ・硬さ知覚

岡本 正吾\*

### 1. ヒトが感じる硬軟とは

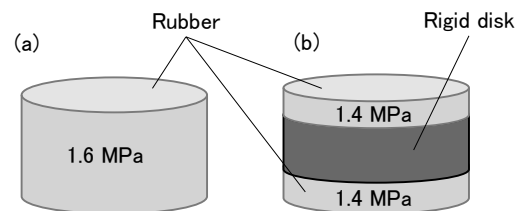
硬さは、一般に物に外力を加えたときのたわみと反力との関係で定義されるものであるから、その知覚は力や関節の運動などに関する自己受容感覚によると思われるがちである。しかしながら、皮膚感覚が重要な役割を果たし[1,2]、時には皮膚感覚の方が自己受容感覚よりも知覚的に優位になる。たとえば、ヤング率が1–2 MPa程度のシリコンゴム製の円柱（直径40 mm、高さ20–40 mm、剛性の等価値20 N/mm程度）では、皮膚感覚と自己受容感覚の硬軟知覚への寄与率は、9：1程度であるとされる[3]。

では、ヒトが知覚する柔らかさとは物理的には何であろうか？ 硬軟を表す指標の代表値といえ、物体の構造にも依存する剛性（ばね定数）と材料そのものの弾性係数（たとえば、ヤング率）であるが、どちらの物理量が、ヒトが感じる硬軟により近いのだろうか。Bergmann Tiest と Kappers は、厚さ（剛性）と素材（ヤング率）の異なる試料をたくさん用意し、同程度に柔らかいと感じられるものを選択するという実験を通して、この疑問に答えようとした[3]。その結果、ヒトは剛性とヤング率の両方を加味して、柔らかさを判断していることがわかった。たとえば、第1図に示すような、材料も構造も異なる2種類の物体が同程度に柔らかいと知覚される。(a)の物体は、ヤング率が1.6 MPaのゴム円柱である。(b)の物体は、ヤング率が1.4 MPaのゴムで剛体を挟んだ円柱である。材料であるゴムの柔らかさのみが知覚に寄与するならば、物体(b)が柔らかいと知覚されるはずである。しかし、物体(b)のゴムは厚みが薄いので、見かけのばね定数については、物体(b)の方が大きい。すなわち、ばね定数のみが知覚に寄与するならば、物体(b)の方が硬いと知覚されるはずである。実際には、ヤング率とばね定数の両方が加味され、両物体は同程度に柔らかいと感ぜられる。ちなみに、柔らかさ知覚のWeber比はおよそ15%であり[3]、たとえば、ヤング率が1 MPaと1.15 MPaの材料の違いがやっとわかるという具合である。

剛性と弾性係数以外にも硬さ知覚に影響する量として、

\* 名古屋大学 大学院 工学研究科 機械システム工学専攻

**Key Words:** tactile sensation, softness, hardness, compliance.



弾性係数 Elastic modulus: (a) > (b)

剛性 Apparent stiffness: (a) < (b)

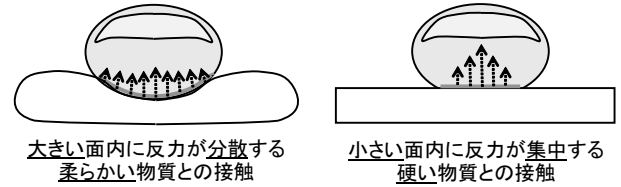
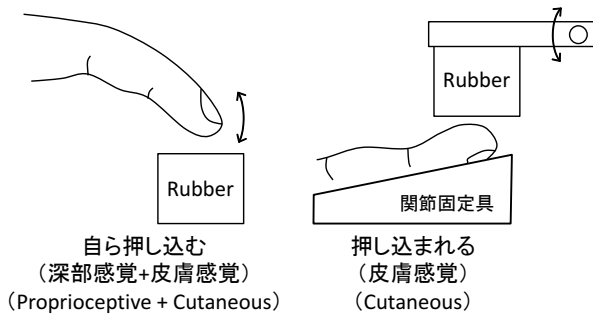
柔らかさ知覚 Softness perception: (a) = (b)

第1図 構造と素材が異なる2種類の円柱の柔らかさ知覚。つまんでみると両物体は同程度に柔らかく感じられる。ゴム柱の直径は40 mm。[3]より描画。

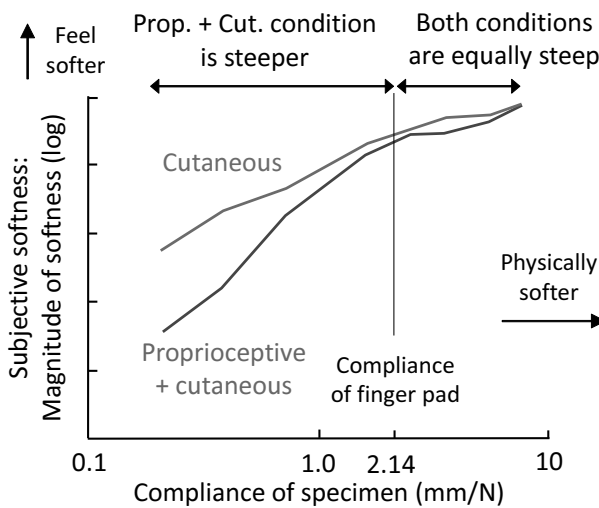
粘性（減衰係数）がある[4,5]。粘性は、指で物をつまんで物体を変形させようとするときに抵抗力を生じさせるため、硬さの知覚に影響する。物体の変形が速いときに大きな抵抗力を生じさせるという特性があり、ヒトの手の手力でも大変形させられるような、ある程度柔らかい物体の硬さ知覚に関しては、粘性は顕著に知覚に影響する。剛性と粘性はどちらも変形しにくさを表す量であるが、そのうち、復元（反発）力につながるのは剛性である。変形の後に復元するという性質は、とくに生体（肌や生鮮食品）の質を判断する際に経験的に用いられており、価値の基準となる。

### 2. 自己受容感覚か皮膚感覚か

柔らかさ知覚の感覚統合(sensory fusion)について、上記を体现する実験結果をもうひとつ紹介する。Friedmanらは、ゴムを対象としてヒトの柔らかさ知覚能力を複数の条件下で調査した[6]。これらの条件では、利用可能な感覚の情報が統制された。第2図左上の条件では、被験者らは自由にゴムを指で押して柔らかさを調査することができた（自己受容感覚と皮膚感覚の両方が利用可能）。右上の条件では、被験者らの指関節が台の上に固定され、露出した指腹に一定の力でゴム片が押し付けられた（皮膚感覚のみが利用可能）。これらの2条件下での柔らかさ知覚特性を調べることで、柔らかさ知覚における自己受容感覚と皮膚感覚の役割が調査された。その結果を第2図下に示す。横軸はゴム片の物理的な柔らかさ（剛性

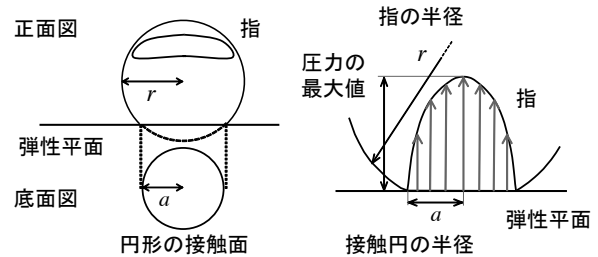


第 3 図 接触時の皮膚変形・接触面積・圧力分布を利用した硬軟知覚



第 2 図 ゴム片に対する柔らかさ知覚実験の結果 (マグニチュード推定法)。左上は、自己受容感覚と皮膚感覚の両方が利用可能な実験条件。右上は指が台に固定されており、関節の変形が固定されているため、皮膚感覚のみが利用可能な条件。下は自己受容感覚と皮膚感覚の役割を比較するグラフ。横軸はゴム片の弾性であり、値が大きいほど柔らかい。傾きの大きさは柔らかさ知覚の感度に対応し、大きいほど軽微な柔らかさの違いが知覚できる。[6]より描画。

の逆数)であり、右側ほど柔らかい。縦軸は被験者が回答した柔らかさの程度であり、上側ほど柔らかく感じられたことを意味する。グラフの傾きは柔らかさ知覚の感度に対応し、傾きが大きいほど感度が優れており、軽微な柔らかさの違いが判断できる。実験結果は、自己受容感覚と皮膚感覚の両方を利用できる条件の方が、グラフの傾斜が大きく、優れた柔らかさ判断につながることを示している。すなわち、ヒトは両方の感覚器官を活用して、柔らかさ知覚の感度を向上させている。この傾向は、とくにゴム片が指腹よりも硬いときに顕著である。一方で、ゴム片が指腹よりも柔らかいときには、両条件のグラフの傾斜には顕著な差がない。すなわち、皮膚よりも柔らかい物の柔らかさ知覚に対しては、自己受容感覚と皮膚感覚を組み合わせる条件と、皮膚感覚のみの条件に差がない。柔らかい物に対しては、皮膚感覚が圧倒的に主体的であるから、皮膚感覚のみで十分な柔らかさの判断が可能である。



第 4 図 Hertz の接触理論による 2 球体の接触モデル

### 3. 柔らかさの触知覚

皮膚感覚に限って言えば、指腹が物の表面に触れると、皮膚と物体が変形し、ヒトはそこから物の柔らかさの情報を手に入れる。実は、皮膚変形のうちのどのような情報が硬軟の知覚に利用されているか、よくわかっていない。しかしながら、少なくとも、指腹と物体表面との間の接触面積および接触面内の圧分布が硬軟知覚と密接な関係にあることが知られている。このような関係は、接触面積と圧、もしくはそのどちらか一方を任意に制御できる特殊な装置を用いて、心理物理学的に明らかにされてきた [7-10]。第 3 図に示すように具体的には、指腹が柔らかい素材に触れるとき、素材の柔らかさからその接触面積は大きくなり、反力は面内に薄く広く分布し、圧力の極大値は小さい。一方で、硬い素材では、反力は小さい面内に集中し、圧力の極大値は大きくなる。このような、接触面積およびその面内での圧力分布を含む変形の違いが、知覚される柔らかさの差異につながる。

硬軟知覚に関する機械受容器は特定されていない。遅順応型であり、圧や静的な変形に感応するメルケル小体の関与が第一に考えられるが、指腹で素材表面を押すときには皮膚が動的に変形するわけであるから、速順応型の受容器の関与も否定できない。指で素材を押すとき、最大反力点での情報のみでなく、押し込んでいる過程での情報も柔らかさ知覚に寄与していることを考えると [11]、指腹の動的な変形ならびに反力に関する動的な情報も利用されていると推察できる。

二つの物体が接触したときの変形や反力の分布を定式化したものとして、ヘルツの接触理論がよく知られている。この理論はいくつかの仮定によって整理されているため、ヒトの指のような不均質で大変形を伴う物体には厳密には当てはまらない。しかしながら、指腹の変形が小さいときや、大局的な挙動を理解するときには重宝さ

れている。

第4図は、指腹を模した球体が弾性平面に荷重  $w$  で接触するときの様子を表す。球体の半径は  $r$  とする。2物体の接触面は円形であり、その半径を  $a$  とする。この半径は、

$$a = \left(\frac{3wr}{4E^*}\right)^{1/3} \quad (1)$$

で現される。ここで、 $E^*$  は有効弾性係数であり、2物体の縦弾性係数とポアソン比によって与えられる ((2)式)。(1)式は、接触面の半径  $a$  は、荷重  $w$ 、球体の半径  $r$  および有効弾性係数  $E^*$  の関数として与えられ、荷重に伴って接触面積が大きくなることを表している。荷重  $w$  はヒトが指で物体を押し力であるから、ヒトにとって既知の値である。球体の半径  $r$  は指の大きさであり、ヒトは自分の指の大きさを知っているとして、こちらも既知の値である。すると、この式は、接触面の半径  $a$  から、平面の弾性係数が推定できると解釈できる。すなわち、ヒトは指の変形量から対象物体の柔らかさを推定できるということになる。

$E^*$  は、指および平面の縦弾性係数  $E_f, E_o$  とそれらのポアソン比  $\nu_f, \nu_o$  によって、

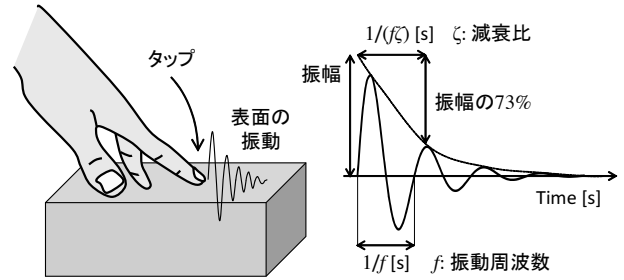
$$E^* = \left(\frac{1-\nu_f^2}{E_f} + \frac{1-\nu_o^2}{E_o}\right)^{-1} \quad (2)$$

で与えられる。ポアソン比はたかだか0.5であり、通常はさらに小さい値であるから、その2乗の値は  $E^*$  には大きく影響しないとして、ここではポアソン比を無視する。すると、 $E^*$  は簡略化され、

$$E^* \sim \left(\frac{1}{E_f} + \frac{1}{E_o}\right)^{-1} \quad (3)$$

となる。これは、 $E_f$  と  $E_o$  のうちどちらか一方の小さい値が支配的に  $E^*$  を決定することを意味する。 $E_o$  が  $E_f$  に比べて十分に大きい場合 ( $E_o \gg E_f$ ) には、 $E_o$  は  $E^*$  にほとんど影響しない。すなわち、ヒトは自分の指よりも硬いものに関しては、指腹の変形からその弾性係数を推定することを得意としない。平たくいえば、指腹よりも硬い対象物を押しても、対象物はほとんど変形せず、指腹ばかりが変形してしまうため、指腹の変形もしくは接触の情報を頼りに対象物の弾性を判断することができない。逆に、 $E_f \geq E_o$  であるとき、 $E_o$  は高い感度で、接触状態に影響する。すなわち、ヒトは自分の皮膚と同じ程度かそれよりも小さい弾性係数を有する素材に対しては、皮膚感覚によって感度よくその弾性係数の違いを判断できる。

先に述べた通り、ヘルツの接触理論は指腹の変形には厳密には成立しない。この理論がどの程度成立するかを議論するために、指腹を剛体面に押し付けられたときの荷重と接触面積の変化の関係がよく論じられる。(1)式によると、接触面積の半径  $a$  は荷重  $w$  の1/3乗に比例する。



第5図 物体表面を叩くことによって生じる物体の減衰固有振動

したがって、接触面積 ( $\pi a^2$ ) は、荷重の2/3乗に比例することになる。確かに、指腹の接触面積は荷重のおおむね0.66乗に比例するが、この指数は0.35から1.3程度まで幅広く報告されている [12]。荷重が小さいときは指数が大きくなり、荷重に伴って指数が小さくなる傾向にある。このことから、荷重に伴って指腹の見かけの弾性係数が増加するともいわれる [12]。

#### 4. 硬さの触知覚

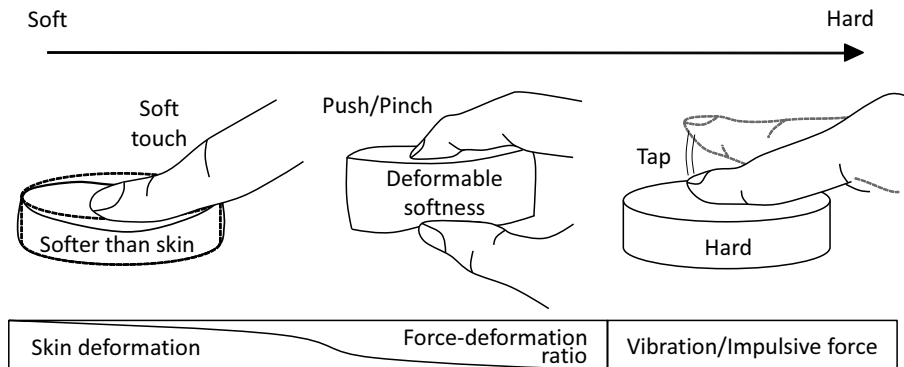
ヒトは自分の皮膚と同等かそれよりも柔らかい物の硬軟については、指を物体に押し付けることで精度よく知覚できるが、この手法は皮膚よりもずっと硬い物の知覚に適さない。硬い物の知覚には、ヒトは別の方法を用いる。物体の表面を軽く叩き (タップ)、そのときに生じる物体の減衰固有振動や衝撃的な反力を基にした硬さ知覚である [6,13-18]。タップしたときに、指が物体表面に接して振動を知覚する時間、もしくは衝撃的な反力が生じる時間はたかだか数十ミリ秒であるが、このわずかな時間に体験される刺激からヒトは物体の硬さを知覚する。

物体が叩かれたときに生じる振動は、その物体の機械的特性を反映している。簡単化のために、この振動を単一の周波数成分からなるものと考えてみる。単一の周波数成分を含む減衰固有振動は、その周波数と振幅、減衰比によって定義される (第5図)。このうち、硬さ知覚に最も関与するのは周波数であり、高い周波数を有する物体ほど硬いと知覚される。この周波数は、おもに物体の剛性によって決定することから、ヒトはタップによって物体の剛性を推定していると思わせる [16,18]。剛性が高いほど、振動の周波数も高くなる。同時に、固有振動の減衰の早さのパラメータである減衰比もしくは主としてそれに影響する物体の減衰係数 (粘性) も硬さ知覚に影響する。減衰係数が大きいほど、振動は早く減衰し、タップしたときに硬く感じられる [16,18]。

物体の表面を軽く叩いたときに生じる実際の振動には、主要な周波数 (基本周波数) 成分以外にもいくつかの際立った高周波成分が含まれる。この高周波成分の存在は、物体をより硬いと知覚させる [19,20]。

第 1 表 3 種類の硬軟知覚の比較表

対象物の硬さ	触察動作	支配的な感覚	原理	影響する物理量
小 皮膚と同じくらいか それよりも柔らかい	そっと触れる	皮膚感覚	皮膚の変形	弾性係数
中 押すとたわむくらい の硬さ	押す, つまむ	深部感覚	たわみと反力の 関係	剛性, 減衰係数 (粘性)
大 人が押しても変形し ないくらい硬い	叩く	皮膚および深 部感覚	振動	剛性, 減衰係数 (粘性)



第 6 図 硬さ/柔らかさの違いによる触察動作の違い

5. 結び: 3 種類の硬軟知覚

参考文献

ここまでの話を整理すると、硬軟の知覚と一口にいっても、第 1 表および第 6 図のように 3 種類に分類できる。

対象物が柔らかいときは、ヒトは物を指で押して柔らかさを判断する。このとき、皮膚と対象物の変形に基づく柔らかさ知覚が主体となり、皮膚感覚を利用して対象物の弾性係数を判断している。つぎに、皮膚よりも硬いが、押ししたりつまんだりして変形させられるような程度の硬さは、対象物に加える力と対象物のたわみの関係として定義される剛性である。ここでは深部感覚が主体的に利用されている。実際には、深部感覚による硬さ知覚と、皮膚変形による硬さ知覚は混在し、対象物が柔らかいほど、後者が占める割合が大きくなることはすでに述べた。最後に、対象物が硬い場合には、叩くことによってわれわれは硬さを判断する。このときに生じる振動をもとに硬さが判断されるが、ダイナミックな現象であるために剛性と減衰係数の両方に硬さの判断は影響される。

対象物の硬さに合わせてわれわれは 3 種類の触察原理を使い分けたり併用している。複数の知覚原理を用いて硬いものから柔らかいものまで、広帯域の知覚を実現している。対象物の硬さにかかわらず一貫して、硬さに関する同一の物理量を判断できればよいが、実際には弾性係数、剛性、減衰係数が混在していることに注意したい。

(2019 年 7 月 25 日受付)

- [1] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers: Kinesthetic and cutaneous contributions to the perception of compressibility; *Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Lecture Notes in Computer Science* (M. Ferre, Ed.), Vol. 5024, pp. 255–264, Springer (2008)
- [2] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte: Tactual discrimination of softness; *Journal of Neurophysiology*, Vol. 73, No. 1, pp. 88–101 (1995)
- [3] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers: Cues for haptic perception of compliance; *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 2, No. 4, pp. 189–199 (2009)
- [4] T. Irie, N. Fujita, H. Nakanishi and M. Ohta: Sensory perception mechanism on softness; *Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. A*, Vol. J91, No. 1, pp. 162–171 (2008)
- [5] F. E. van Beek, D. J. F. Heck, H. Nijmeijer, W. M. Bergmann Tiest and A. M. Kappers: The effect of damping on the perception of hardness; *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, pp. 82–87 (2015)
- [6] R. M. Friedman, K. D. Hester, B. G. Green and R. H. LaMotte: Magnitude estimation of softness; *Experimental Brain Research*, Vol. 191, pp. 133–142 (2008)
- [7] A. Bicchi, E. P. Schilingo and D. De Rossi: Haptic discrimination of softness in teleoperation: The role of the contact area spread rate; *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, Vol. 16, No. 5, pp. 496–504 (2000)

- [8] K. Fujita and H. Ohmori: A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control; *Proceedings of 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics, and Informatics*, pp. 78–82 (2001)
- [9] F. Kimura, A. Yamamoto and T. Higuchi: Development of a 2-dof softness feeling display for tactile tele-presentation of deformable surfaces; *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1822–1827 (2010)
- [10] E. P. Scilingo, M. Bianchi, G. Grioli and A. Bicchi: Rendering softness: Integration of kinesthetic and cutaneous information in a haptic device; *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 2, pp. 109–118 (2010)
- [11] H. Z. Tan, N. I. Durlach, G. L. Beauregard and M. A. Srinivasan: Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues; *Perception & Psychophysics*, Vol. 57, pp. 495–510 (1995)
- [12] J. van Kuilenburg, M. A. Masen and E. van der Heide: A review of fingerpad contact mechanics and friction and how this affects tactile perception; *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 229, No. 3, pp. 243–258 (2015)
- [13] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky and J. T. Dennerlein: Reality-based models for vibration feedback in virtual environments; *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 245–252 (2001)
- [14] K. J. Kuchenbecker and G. Niemeyer: Improving telerobotic touch via high-frequency acceleration matching; *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3893–3898 (2006)
- [15] K. Higashi, S. Okamoto and Y. Yamada: Effects of mechanical parameters on hardness experienced by damped natural vibration stimulation; *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1539–1544 (2015)
- [16] K. Higashi, S. Okamoto and Y. Yamada: What is the hardness perceived by tapping?; *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications, Part I*, ser. Lecture Notes in Computer Sciences (F. Bello, H. Kajimoto, and Y. Visell, Eds.), Vol. 9774, pp. 3–12, Springer (2016)
- [17] K. Higashi, S. Okamoto, Y. Yamada, H. Nagano and M. Konyo: Hardness perception by tapping: Effect of dynamic stiffness of objects; *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, pp. 37–41 (2016)
- [18] K. Higashi, S. Okamoto and Y. Yamada: Perceived hardness through actual and virtual damped natural vibrations; *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 11, No. 4, pp. 646–651 (2018)
- [19] K. Kuchenbecker, J. Fiene and G. Niemeyer: Improving contact realism through event-based haptic feedback; *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, No. 2, pp. 219–230 (2006)
- [20] K. Higashi, S. Okamoto, H. Nagano, M. Konyo and Y. Yamada: Perceived hardness by tapping: The role of a secondary mode of vibration; *Haptic Interaction: Science, Engineering and Design*, ser. , Lecture Notes in Electrical Engineering (S. Hasegawa, M. Konyo, K.-U. Kyung, T. Nojima, and H. Kajimoto, Eds.), Vol. 432, Springer (2016)

## 著者略歴

おかもと しょうご  
岡本 正吾



2010年3月東北大学大学院情報科学研究科応用情報学専攻博士課程後期3年の課程修了。現在、名古屋大学大学院工学研究科機械システム工学専攻准教授。ハプティクス、支援機械システム、感性工学の研究に従事。