

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 衝突時における硬さの知覚および表現に関する研究                                                                                                                                                                         |
| Title(English)    | Study on Hardness Perception and Rendering at Collision                                                                                                                                         |
| 著者(和文)            | 齋藤靖之                                                                                                                                                                                            |
| Author(English)   | Yasuyuki Saito                                                                                                                                                                                  |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第11186号,<br>授与年月日:2019年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:只野 耕太郎,小俣 透,小池 康晴,八木 透,長谷川 晶一                                                                         |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第11186号,<br>Conferred date:2019/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                            |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                                 |
| 種別(和文)            | 論文要旨                                                                                                                                                                                            |
| Type(English)     | Summary                                                                                                                                                                                         |

## 論文要旨

### THESIS SUMMARY

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| 系・コース：                           | 機械系         |
| Department of, Graduate major in | ライフエンジニアリング |
| 学生氏名：                            | 齋藤 靖之       |
| Student's Name                   |             |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 申請学位 (専攻分野)：              | 博士 (工学)   |
| Academic Degree Requested | Doctor of |
| 指導教員 (主)：                 | 只野 耕太郎    |
| Academic Supervisor(main) |           |
| 指導教員 (副)：                 |           |
| Academic Supervisor(sub)  |           |

#### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本研究では、ハプティックデバイスを用いたロボットの遠隔操作による迅速で確実な作業を実現するにあたって重要となる、高剛性環境との接触における硬さの知覚および表現を可能とする遠隔操作システムの開発を目的とする。高剛性環境との接触における硬さの知覚および表現を実現するために、硬さの知覚メカニズムを解明し、そのメカニズムに基づいて硬さ知覚の指標を提案する。また、ハプティックデバイスの硬さ表現能力の向上方法を提案し、遠隔操作システムを通して提案した硬さ知覚の指標および硬さ表現能力の向上方法の有効性を実証する。

第一章では、研究背景について述べた。ロボットの新しい市場として建設分野が期待されており、人の代わりにロボットを遠隔地で作業させるには、ハプティックデバイスによる遠隔操作および感覚提示が有効であることについて述べた。一方で、遠隔操作システムにおいて人と同じような作業を行うには、ハプティックデバイスに高剛性環境の硬さを表現する能力が求められることを示した。また、硬さについて調査・検討し、硬さ知覚の原理が解明されておらず、機械的な刺激に対する明確な指標が存在しないことを確認した。そのため、遠隔操縦システムにおいて高剛性環境との衝突時の硬さ表現を行うには、硬さ知覚メカニズムの解明、機械的な刺激に対する硬さ知覚の指標の導出、ハプティックデバイスの硬さ表現能力の向上が課題となることを示した。

第二章では、衝突時における硬さ知覚メカニズムについて述べた。スタイラスを用いたタップ動作においては、手とスタイラスでは知覚する硬さに差が生じ、スタイラスでタップしたときには2度打ちが発生することを実証した。また、2度打ちの主要因がスタイラスのはねかえりであることを特定し、はねかえりに伴って皮膚変形が発生することを示した。ここから、はねかえりに伴う皮膚変形がパチニ小体で知覚されると仮定し、タップ動作によって発生する皮膚感覚への刺激量を算出する方法を提案した。算出された皮膚感覚への刺激量と知覚する硬さの関係を調べ、非常に強い相関があることを実証した。また、2度打ちがパチニ小体への刺激として硬さ知覚に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

第三章では、衝突時における硬さ知覚の指標について述べた。第二章の結果に基づいて、皮膚感覚への刺激量と衝突速度の比を硬さ知覚の指標として提案し、ハプティックデバイスの仮想壁およびブロックを用いて提案した硬さ知覚の指標を評価した。その結果、仮想壁で表現される硬さと提案した硬さ知覚の指標に相関があり、算出した皮膚感覚への刺激量が衝突速度の比となることを実証した。また、知覚する硬さが同程度となる仮想壁とブロックの組合せを調べた結果、知覚する硬さが同程度であっても、仮想壁とブロックで提案した硬さ知覚の指標の数値が一致しないことを確認した。これにより、提案した硬さ知覚の指標は衝突時に知覚する硬さに対する絶対値ではなく、知覚する硬さを比較評価するための数値であることが示された。

第四章では、ハプティックデバイスの硬さ表現能力を向上する方法について述べた。第二章の結果に基づいて、小型アクチュエータの振動を効率的に活用する方法を提案し、提案した方法を実現可能なU字型スタイラスを設計、硬さ知覚に及ぼす影響を調べた。その結果、U字型スタイラスを300Hz付近で共振させ、提示時間を20msとすることで、ハプティックデバイスの硬さ表現能力を効果的に向上できることが明らかとなった。また、従来の方法では不可能であった、ふっ素樹脂およびアルミニウムブロックに相当する硬さを表現できることが実証された。

第五章では、第三章において提案した硬さ知覚の指標および第四章において提案した硬さ表現能力の向上方法を適用した遠隔操作システムにおける硬さ表現方法について述べた。この硬さ表現方法を行うにあたって必要となる提案した硬さ知覚の指標の拡張を行い、硬さ知覚の指標の換算係数およびモデル係数との関係式を導出し、その評価を実施した。その結果、ロボットに衝突する物体が未知であっても、違和感を与えることなく、確実かつリアルタイムに硬さ知覚の指標に準じた硬さをハプティックデバイスで表現できることが明らかとなった。

以上から、本論文では、衝突時の硬さ知覚メカニズムを解明し、そのメカニズムに基づいて硬さ知覚の指標およびハプティックデバイスの硬さ表現能力の向上方法を提案、知覚評価実験および計測実験により硬さの知覚および表現に対して有効であることを実証した。また、提案した指標および向上方法を遠隔操作システムに適用し、これらにより遠隔操作システムにおいて高剛性環境の硬さ表現が可能となることを実証した。

(博士課程)  
Doctoral Program

# 論文要旨

THESIS SUMMARY

|                                  |              |     |
|----------------------------------|--------------|-----|
| 系・コース：                           | 機械           | 系   |
| Department of, Graduate major in | ライオンエンジニアリング | コース |
| 学生氏名：                            | 齋藤 靖之        |     |
| Student's Name                   |              |     |

|                           |           |        |
|---------------------------|-----------|--------|
| 申請学位 (専攻分野)：              | 博士        | ( 工学 ) |
| Academic Degree Requested | Doctor of |        |
| 指導教員 (主)：                 | 只野 耕太郎    |        |
| Academic Supervisor(main) |           |        |
| 指導教員 (副)：                 |           |        |
| Academic Supervisor(sub)  |           |        |

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

Remote control and sensation presentation by a haptic device are effective when operating with a robot. However, expressing the hardness by just reproduction of interaction force at a haptic device is insufficient. On the other hand, the hardness perceived when touching is one important sensation for object recognition. Therefore, in this paper, we aimed to develop a remote control system that enables perception and rendering of hardness when contacting object with high stiffness. First, we investigated the mechanism of hardness perception when tapping with a stylus. We confirmed that a double-strike occurred by bouncing of the stylus and showed that there is a very strong correlation between activation of Pacinian corpuscles due to the double-strike and the perceived hardness. In addition, we proposed the ratio between the stimulus intensity and the impact velocity as an index of hardness perception and confirmed the relation between the index and the hardness perceived by the operator. Second, we proposed and designed a U-shaped stylus using vibration, and investigated its effect on hardness perception. We cleared that the hardness rendering ability of the haptic device were effectively improved by resonating the U-shaped stylus around 300 Hz and setting the presentation time to 20 ms. Third, we proposed a hardness rendering method using the index and the U-shaped stylus, and conformed that the haptic device can render the hardness in real time even if the object in contact with the robot is unknown. As above all, we clarified the mechanism of hardness perception when tapping with a stylus, proposed an index of hardness perception and a method for improving hardness rendering ability of haptic device. We also showed that the remote control system could render the hardness of object with high stiffness by applying our proposal.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).