

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), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11186号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 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), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11186号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文の要旨

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した。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した。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した。以下にその要旨を記す。

1. 序論

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、遠隔操作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。

2. 衝突時の硬さ知覚メカニズム

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。

ハプティックデバイスにおいて物体に衝突する動作は、衝突を人為的に行うにタップ動作に相当する。タップ動作には、手でタップする場合とスタイラスを用いてタップする場合があるが、スタイラスを介して操作されるハプティックデバイスでは、スタイラスを用いたタップ動作に相当する。どちらも同じタップ動作ではあるが、手でタップする場合には物体の振動などの影響を受ける一方で、スタイラスでタップする場合にはスタイラスの運動が影響する。そこで、硬さ知覚に影響を及ぼす刺激を発生させる対象を明らかにするために、手とスタイラスにおいてブ

ブロックをタップしたときに知覚する硬さを比較した。その結果、手とスタイラスでは知覚する硬さの弁別に差が生じることが確認された。これにより、スタイラスを用いたタップ動作においては、スタイラスの運動が硬さ知覚に影響を及ぼすことが示唆された。

硬さ知覚は皮膚感覚への刺激が主要因とされ、皮膚感覚は皮膚変形によって生起される。スタイラスによるタップ動作では把持するスタイラスの運動によって皮膚変形がもたらされることから、スタイラスの運動が硬さ知覚に影響を及ぼしていると予想される。そこで、スタイラスでブロックをタップしたときのスタイラスの運動と知覚する硬さの関係を調べた。その結果、衝突時に発生する加速度波形が減衰振動または2度打ちになることが確認された。また、知覚する硬さは、減衰振動が発生するときには加速度の最大値との関係性が見られるのに対し、2度打ちが発生すると加速度の最大値には依存しなくなることが明らかとなった。これにより、スタイラスの2度打ちが硬さ知覚に影響を及ぼすことが示唆された。

2度打ちが硬さ知覚に影響を及ぼすとすれば、2度打ちに伴って皮膚変形が発生し、その皮膚変形が硬さ知覚に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、2度打ちの発生要因を加速度計測および高速度撮影から特定し、タップ動作において硬さ知覚に影響を及ぼす皮膚変形が発生することを調べた。その結果、剛性の高いスタイラスで剛性の高いブロックをタップしたときに発生する2度打ちは、スタイラスのはねかえりが主要因であることが明らかとなった。また、衝突時のスタイラスと指の運動からはねかえりに伴って皮膚変形が発生することを明らかにした。ここで、2度打ちによる皮膚変形は非常に速い刺激となることから、皮膚変形を感受する機械受容器の特性からパチニ小体で知覚されることが考えられる。そこで、パチニ小体の特性から2度打ち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示し、また、この算出方法を用いて、計測した加速度波形から2度打ちによる皮膚感覚への刺激量を算出した。

以上から、スタイラスを用いたタップ動作において発生する2度打ちは硬さ知覚に影響を及ぼし、その刺激はパチニ小体によって感受されていると予想される。そこで、スタイラスでブロックをタップしたときに知覚する硬さと2度打ちによる皮膚感覚への刺激量を比較し、皮膚感覚への刺激量と知覚する硬さの関係を調べた。その結果、スピアマンの順位相関係数において $\rho = 0.90$ となり、これらの関係には非常に強い相関があることが示された。また、スタイラスを用いたタップ動作では、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。

3. 衝突時における硬さ知覚の指標

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。

硬さ知覚の指標は、振動や皮膚の伸展などの反力とは異なる機械的な刺激によってロボットが衝突した物体の硬さをハプティックデバイスで適切に表現する際に必要とされ、遠隔操作シ

システムにおいて物体の硬さを表現するにあたって重要となる。第二章で述べたパチニ小体への刺激量の総和は硬さ知覚の評価指標の1つと捉えることができる。硬さ知覚の評価指標には RH (Rate-Hardness) が知られており、RH は物体に接触したときの力変化量と衝突速度の比とされる。これを踏まえて、パチニ小体への刺激量の算出式を衝突速度で除算すると、RH と刺激量の関係式が表れる。また、振動や皮膚の伸展などの機械的な刺激は、パチニ小体への刺激を変化させることに繋がると考えることができる。そのため、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た。

提案した硬さ知覚の指標をハプティックデバイスの仮想壁を用いて評価した。その結果、ハプティックデバイスの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ることを明らかにした。また、異なる衝突速度でタップしたときに算出される硬さ知覚の指標を比較した。その結果、タップ動作に用いるスタイラスとブロックが同じであれば、硬さ知覚の指標は衝突速度に依存せずに同程度の数値を示すことが明らかとなった。すなわち、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。さらに、ハプティックデバイスの仮想壁で表現される硬さをスタイラスでブロックをタップしたときに知覚する硬さで評価し、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。その結果、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。

4. ハプティックデバイスの硬さ表現能力の向上

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。知覚評価実験の結果から、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。

本研究で使用するハプティックデバイスでは、減衰正弦波モデルを用いることで木材と同程度の硬さを表現することができる一方で、樹脂や金属の硬さを表現することは難しい。これらの硬さを表現するには、硬さ知覚と相関のあるパチニ小体への刺激量を大きくし、ハプティックデバイスの硬さ表現能力を向上させる必要がある。そこで、ハプティックデバイスに VCM を導入し、硬さ知覚に対して効果的な振動刺激を作用力とは別方向に提示する方法を提案し、その手段としてスタイラスの共振による振幅の拡大、共振周波数の調整、提示時間の延伸を挙げ、この 3 つを実現可能な U 字型スタイラスを設計した。また、各 U 字型スタイラスで設計したとおりの

共振周波数を有していることを確認した。次に、VCM の入力振幅を等しくしたときの各 U 字型スタイラスの共振周波数における振動刺激の強さを調べた。その結果、共振周波数 250Hz が振動刺激を最も強く感じることを確認され、パチニ小体の周波数特性に応じた結果となることが実証された。

この U 字型スタイラスを用いてハプティックデバイスの硬さ表現能力が向上できることを確認した。はじめに、各 U 字型スタイラスを用いて共振による振幅の拡大が硬さ知覚に及ぼす影響を調べた。その結果、全ての U 字型スタイラスにおいて共振周波数を提示したときの仮想壁が最も硬く感じられることを実証した。このことから、共振による振幅の拡大が硬さ知覚に対して有効であることが明らかとなった。次に、U 字型スタイラスの共振周波数が硬さ知覚に及ぼす影響を調べた。その結果、共振周波数 300Hz の U 字型スタイラスが最も仮想壁を硬く感じることを実証した。このことから、共振周波数の調整が硬さ知覚に対して有効であることが明らかとなった。最後に、U 字型スタイラスの振動の提示時間が硬さ知覚に及ぼす影響を調べた。その結果、振動の提示時間が 20ms のときの仮想壁が最も硬く感じ、40ms 以上になると表現される硬さに違和感を覚えるようになることが実証された。このことから、振動の提示時間の延伸が 20ms 以内であれば、硬さ知覚に対して有効であることが明らかとなった。

以上から、U 字型スタイラスを用いて振幅の拡大、共振周波数の調整、提示時間の延伸を行うことで、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。そこで、この提案したハプティックデバイスの硬さ表現能力の向上方法における硬さ知覚への効果を調べた。その結果、U 字型スタイラスを共振させることで VCM の入力振幅換算で 1.4 倍以上の効果を生み出せることが実証された。また、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。以上より、提案した向上方法を用い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。

5. 遠隔操作システムにおける硬さ表現

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。

実環境下にある遠隔操作システムにおいては、ロボットが接触する物体の機械特性を事前に把握しておくことが難しく、硬さ表現に必要な計測は接触と同時に行う必要がある。そのため、遠隔操作システムでは、未知の物体に対して確実かつリアルタイムな硬さ表現が要求される。第三章において提案した硬さ知覚の指標においては、計算コストが少なく、物体の事前情報を必要としないことから、接触する物体が未知であっても衝突現象の終了と同時に算出でき、遠隔操作システムにおける硬さ表現に必要とされるリアルタイム性の確保に繋がると考えられる。また、第四章において提案した硬さ表現能力の向上方法においては、ハプティックデバイスに表現した仮想壁をより硬く感じさせることができ、VCM モデルによる仮想壁を硬さ知覚の指標に基づ

いて発生させることで、知覚する硬さに準じた硬さ表現が可能になると考えられる。そこで、遠隔操作システムにおける硬さ表現方法として、ロボットに発生する反力から硬さ知覚の指標を算出し、算出した硬さ知覚の指標が知覚する硬さの相対評価であることを踏まえてハプティックデバイスにおいて仮想壁による硬さ表現を行うことで、ロボットが接触した物体の硬さを操作者に表現することを提案した。

ここで、提案する硬さ表現方法を使用するにあたっては、ロボットとハプティックデバイスの硬さ知覚の指標の換算係数およびハプティックデバイスの硬さ知覚の指標と仮想壁のパラメータとの関係を事前に求めておく必要がある。また、VCM モデルを提案した硬さ表現方法に適用するには、提案した硬さ知覚の指標を方向の異なる加速度または反力に対しても、硬さ知覚の指標を算出できるように拡張する必要がある。

第三章において提案した 硬さ知覚の指標を複数方向の刺激に対応できるよう拡張し、拡張した硬さ知覚の指標をハプティックデバイスの仮想壁を用いて評価した。接線方向と垂直方向による皮膚変形に対して個々にパチニ小体への刺激が発生していると仮定し、接線・垂直方向の刺激量に対して個々に算出した結果を加算した数値を硬さ知覚の指標とした。実験の結果、拡張した硬さ知覚の指標と知覚する硬さに相関があることが明らかとなった。また、硬さ知覚の指標から VCM モデルのパラメータを算出する関係式を導出した。関係式は、柔らかい物体から硬い物体までの幅広い硬さ表現が行えるよう、硬さ知覚の指標が小さい場合はばねダンパモデル、大きい場合には VCM モデルを用いるものとして場合分けした。さらに、遠隔操作システムでブロックをタップしたときに発生する反力を計測し、硬さ知覚の指標を算出した。それぞれで算出した硬さ知覚の指標の範囲から、ロボットからハプティックデバイスへの換算係数として 0.2 を採用した。

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適用した遠隔操作システムにおける硬さ表現方法において、ロボットが物体と衝突したときにハプティックデバイスで表現される硬さを評価した。その結果、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それぞれ物体の硬さをハプティックデバイスの硬さ表現能力に合わせて表現できることが実証された。これらの結果から、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。

6. 総括

第六章 結論では、各章で得られた結論を総括し、今後の展望について述べた。

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。

今後の課題として、硬さ知覚の指標の改善、硬さ以外の知覚に対する影響、実作業への拡張、その他領域への展開を挙げ、本研究結果が広範囲に活用できる可能性があることを述べた。