

弾性/塑性/脆性で材質感を表現する通信遅延が 1ms の力覚デバイス

中山 功一[†] 大島 千佳[†] 安藤 広志[†]

Haptic Rendering of Elastic / Plastic / Brittle material with Short Delay Communication

KOICHI NAKAYAMA[†] CHIKA OSHIMA[†] HIROSHI ANDO[†]

1. はじめに

当研究センターでは、見る／聞く／香るだけでなく、“触る”ことで臨場感の高いコミュニケーションの実現を目指している。特に、大画面から飛び出して見える仮想物体をつかんで操作する感覚を実現するための携帯型の力覚デバイスを研究開発している（図 1）。

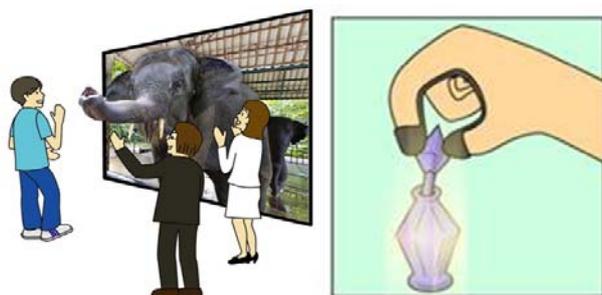


図1 大画面立体ディスプレイと携帯型力覚デバイスの概念図

筆者らは、硬い物体を把持した感覚を提示する力覚デバイスに必要な性能を被験者実験により明らかにした[1][2]。また、従来の力覚デバイス[3][4]では提示できない硬さまで提示できる携帯型力覚デバイスを製作した（図 2）[5]。



図2 携帯型力覚デバイスの 1 号機



図3 立体映像同期システム

さらに、力覚デバイスと立体映像を同期させ、立体映像中の仮想物体を把持して操作する感覚を提示するシステムを製作した（図 3）。しかし、これらは力覚情報を遠隔地と通信していない。本研究では、遠隔地と力覚情報を共有し、よりリアルな材質感を表現するために、以下の 3 つの特徴をもつ 2 台の力覚デバイスを製作する。

特徴 1：2 台のデバイス間で力覚情報を 1ms 以下の遅延で双方向通信できる。

特徴 2：弾性物体だけでなく、塑性変形や脆性破壊（ヒステリシス）を考慮した物理モデルをもつ。

特徴 3：力覚デバイスの位置情報をモーションキャプチャシステムにより取得できる。

特徴 1 により、力覚情報の双方向通信における様々な大きさの遅延の影響を体感できる。特徴 2 により、陶磁器／紙粘土／ゴムといった異なる材質感を提示できる。特徴 3 により、仮想物体をつかんで三次元空間中で操作できる。

本稿で提案する携帯型の力覚デバイスでは、握り部分に内蔵されたモータの回転を、ワイヤを介して 2 指（親指と人差し指）に伝達する。2 指と力覚デバイスの接触部分にはそれぞれ圧力センサが装着され、指がデバイスに加える力（＝デバイスが指に与える反力）

[†] NICT ユニバーサルメディア研究センター
NICT Universal Media Research Center

をセンシングする。デバイスに内蔵されたモータにはエンコーダが装着されており、2 指の間隔が得られる。

本稿では、2 章で、特徴 1 を利用した力覚情報の通信で許容される遅延について述べ、3 章で、特徴 2 のヒステリシスを考慮した物理モデルによる材質感の表現について述べる。4 章で、特徴 3 により仮想物体を三次元的に操作できるデモシステムについて述べ、5 章で考察し、6 章でまとめる。

2. 力覚情報通信における遅延の影響

現実の世界で一つの剛体を二人でつかんで操作する場合には、力覚情報が遅延無く伝わる。一方、遠隔地との通信には有限の遅延が存在する。電話などの聴覚情報通信では、遅延が 200ms を超えると違和感を覚えることが知られているが、力覚情報通信の遅延がどの程度まで許容されるのかは明らかではない。

従来の力覚デバイスでも、力覚情報と映像情報の両方を提示する場合における力覚情報の遅延については研究されている[6]。また、双方向通信ではなく一方向に送信する場合には、遅延の影響は無視できる。一方、力覚情報を遠隔地と共有する場合には、遅延の影響が大きい。例えば、100ms の遅延があるシステムで、一人が剛体の右端を左方向に、別の一人が左端を右方向に、同時に押した場合を考える。左端を押す人からみると、100ms 前には右端は押さえられていないため、右方向に押し込むことができる。同様に、右端を押す人も左方向に押し込める。この結果、100ms 後に剛体は大きく縮んだことになる。また、相手が押す力をそのままの大きさの反力として出力しても縮んだ剛体の長さが戻らないため、より強い力を両側に返す必要が生じる。その結果、制御が不安定になり、違和感を覚える。

力覚デバイスの制御周期は 1ms であっても、遠隔地の力覚情報をそれほど短時間で通信できるものが存在しない。人間の認知メカニズムにとって、許容される遅延がどの程度であるかを検証するには、人間が違和感を覚えない程度まで遅延を小さくできる複数台の力覚デバイスを用意して、遅延の大きさを様々に変更した心理物理実験が有効である。しかし、これまでの力覚デバイスでは遅延が大きいため、検証できなかった。

提案する力覚デバイスでは、一つの制御器で 2 台の力覚デバイスを同時に制御することで、力覚情報のデバイス間通信に要する時間を 1ms 以下に抑える。具体的には、2 台の力覚デバイスに 2 つずつ装着された計 4 つの圧力センサが示す値を制御器が取得し、2 台

の力覚デバイスを 1ms 以下の周期で同時に制御する。すなわち、一方の力覚デバイスの圧力センサが示す力の値に基づき、もう一方の力覚デバイスを 1ms 以下の遅延で制御することが可能となる。これにより、例えば、両手に持った二つのデバイスの指の間隔の“和”が一定となるように制御すると、誰かが持っている箸の右側を右手で、左側を左手で操作するシーソーのような感覚が体験でき、指の間隔の“比”が一定となるよう制御すると、はさみの右端を右手で、左端を左手で持って動かす操作が体験できる。

本展示発表の前半では、まず、一人でこの 2 台の力覚デバイスを右手と左手で握ってもらい、指の間隔の和が一定となるように制御する。これにより、右手の 2 指が押す力を、左手の 2 指がほぼ同時に感じられる。このとき、力覚情報の通信に要する時間を 1ms から徐々に増加させていき、どの程度まで遅延が増加すると違和感を覚えるか体験してもらい、力覚情報通信の遅延による影響を直感的に理解してもらう。次に、2 台の力覚デバイスを 2 人で操作してもらうことで、遠隔地の人と力覚情報を共有する感覚を体験してもらう。

3. ヒステリシスを考慮した物理モデル

ヒステリシスとは、「物質や系の状態が、それまでたどってきた経過に依存すること」である。例えば、紙粘土はゴムとは異なり、加える力を最初の状態に戻しても、一度押した部分が戻らずに変形したままであり、いわゆる塑性変形が発生する。すなわち、物体の形状が、現在加えられている力だけでなく、過去に加わった力に依存する。また、例えば陶磁器などは、強い力をかけると大きく変形する前に割れてしまう。いわゆる脆性破壊が発生する。

従来の力覚デバイスでは、指先（またはスタイラス）の位置に応じて反力を計算するものが多い。このとき、反力は、仮想物体に食い込んだ距離を変数、反力を出力とする一つの関数として表現され、仮想物体を押し込むときも戻るときも同じ位置であれば同じ反力を返す。このような一つの関数ではヒステリシスを考慮できない。このため、塑性変形や脆性破壊が表現できず、例えばゴム（弾性変形）と紙粘土（塑性変形）の材質感の違いや、ゴム（弾性変形）と陶磁器（脆性破壊）の材質感の違いなどが表現できない。

本稿では仮想物体の物理モデルとして、ヒステリシスを考慮する弾性／塑性／脆性モデルを提案し、実装する。

例えば、通常の鋼（図 4 左）は、図中に示された降伏点までは弾性変形する。この変形は可逆変化であり、

ヒステリシスを考慮する必要が無い。降伏点を越えて変形すると不可逆変化となり、ヒステリシスを考慮する必要がある。また、力を加えていって脆性破壊の発生後は反力を返さなくなるが、これも不可逆変化であり、ヒステリシスを考慮する必要がある。一方、アルミニウム合金（図 4 右）のように、明確な降伏点を持たない材料も存在するが、ひずみが大きくなると塑性変形が発生するという意味で、ヒステリシスを考慮する必要がある。

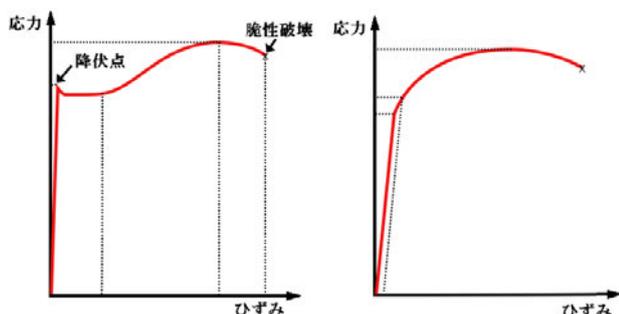


図4 鋼（左）とアルミニウム合金（右）の応力-ひずみ線図[7]

本研究で提案する弾性/塑性/脆性モデルでは、弾性変形領域/塑性変形領域/脆性破壊変位を定義し、弾性領域を可逆変化で、塑性領域を不可逆変化でモデル化し、脆性破壊変位を越えて変形した物体を破壊されるものとしてモデル化する。

例として、ある仮想物体の弾性変形領域が 5mm で、その間のバネ定数が 10N/mm、塑性変形領域が 5～10mm でその間のバネ定数が 2N/mm、脆性破壊変位が 20mm である場合に、10mm 変形させてから一度離れた後、20mm まで変形させる場合の反力-変位線図は図 5 のようになる。なお、仮想物体の長さを 100mm、変位させる断面積が 1mm²、ヤング率を 1GPa とした場合は、変形(mm) の値はひずみ(%)の値と等しく、反力(N)の値は応力(N/mm²)の値と等しい。

現実の材料の多くは、弾性変形のみでは表現できず、弾性変形/塑性変形/脆性破壊の組合せで表現できると考えられる。例えば、ゴムは弾性変形領域が広い材料としてモデル化できる。紙粘土は弾性変形領域が狭く塑性変形領域が広い材料として、陶磁器は弾性変形および塑性変形領域が狭く、脆性破壊変位が小さい材料としてモデル化できる。

従来の力覚デバイスのほとんどが、弾性変形のみが発生する仮想物体の物理モデルを用いており、塑性変形および脆性破壊が発生する物体を提示できない。これら弾性変形/塑性変形/脆性破壊を組み合わせることで、様々な材料を把持した場合の材質感が得られる。

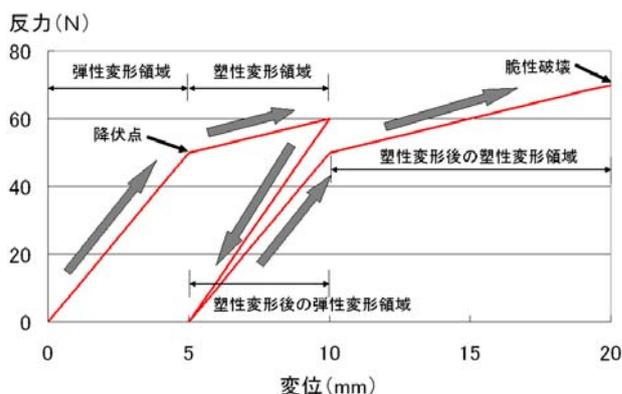


図5 仮想物体の荷重-変位線図の例

この物理モデルは、例えば陶芸の粘土がどの程度の力で変形するのかを学ぶ場合や、非常ベルのカバーがどの程度の力で破壊できるのかを学ぶ場合などに有効であると考えられる。

本展示発表の後半では、弾性/塑性/脆性モデルにより初めて表現できるようになった様々な材料からなる仮想物体の材質感を体験してもらう。

4. 仮想物体の三次元操作システム

従来の非接地型力覚デバイスでは、デバイスの位置情報の取得が容易ではないため、力覚デバイスを用いた操作により、仮想物体を三次元的に操作できるものが少なかった。本システムでは、光学式モーションキャプチャシステムと映像表示用 PC を接続することで、映像中の仮想物体を把持して三次元的に操作する感覚を得る。本展示発表では、文献[5]で用いた立体映像同期システム（図 3）を改良して用いる（図 6）。

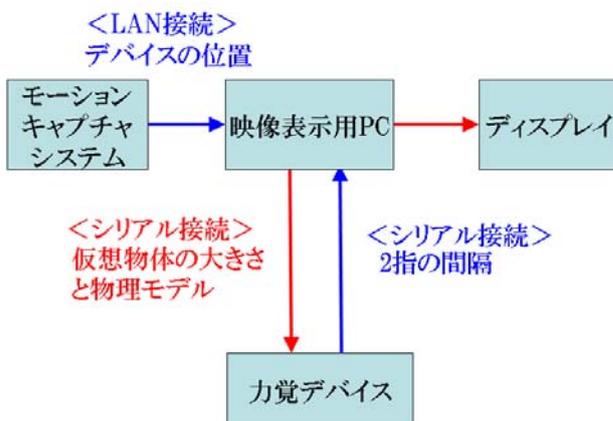


図6 三次元映像操作システムの構成

モーションキャプチャシステムは、Radish/3D（カラー2 カメラ方式）を用いる。ディスプレイの両脇に設置した2つのカメラから得られた画像情報から、デバイスに装着した LED カラーマーカーの位置を計算

する。計算された各マーカーの位置から、デバイスの位置情報を得る。得られた位置情報は、LAN により接続された映像表示用 PC に送信される。

映像表示用 PC は、モーションキャプチャシステムからユーザが持つデバイスの位置を LAN 接続で獲得し、デバイスから指先の間隔を示す値をシリアル接続で獲得する。2 指間に仮想物体が存在する場合には、その大きさと物理モデル（弾性/塑性/脆性モデル）をデバイスに送信する。ただし、物理モデルに基づいた反力の制御はデバイスの制御器が 1ms 以下の周期で行い、映像表示用 PC はその制御結果としての 2 指の間隔のみを受け取る。これらの情報に基づき、映像表示用 PC 内の OpenGL により仮想空間中の仮想物体および把持する位置を記述する。

5. 考察

本研究において学術的に重要な点は、遅延を 1ms 以下に抑えた力覚デバイスにより、力覚情報通信に許容される遅延について実験的に検証できるようになった点である。力覚情報通信に許容される遅延が明らかになれば、今後、力覚情報を共有する力覚通信システムを製作する際に、遅延をどの程度まで抑えるべきかを検討する指標となり得る。

また、弾性変形や塑性変形、脆性破壊を表現できるヒステリシスを考慮した物理モデルの提案と実装により、ヒステリシスが材質感の認知メカニズムに対して与える影響を実験的に検証できるようになった点も学術的に重要である。特に近年、医学的な応用として、触診や手術用シミュレータなどが開発されているが、例えば足のむくみなどは、生体表面の硬さが変化するのではなく、本来は弾性物体に近い生体表面が塑性変形物体のように抑えた指の痕が残る現象として観察される。すなわち、医師が判断材料としている触覚情報は弾性変形に限らないため、従来の物理モデルだけでは表現できない可能性が高い。このため、塑性や脆性などのヒステリシスも考慮する物理モデルとそれを表現する力覚デバイスが重要である。

展示発表として重要な点は、力覚情報通信の遅延を様々に変化させることができるため、参加者がどの程度まで遅延が増加すれば違和感を覚えるかをその場で体験できる点である。また、提案した物理モデルにより、弾性変形領域が小さく塑性変形領域の広い紙粘土のような材質感や、弾性変形領域や塑性変形領域が小さく、脆性破壊ひずみが小さい陶磁器のような材質感を体験できる点も重要である。これらの展示発表は、従来の力覚デバイスでは体験できないものばかりであ

る。

遅延により違和感を覚えるかどうかや、新たな物理モデルにより材質感を得られるかどうかは、実際に体験しないと分からないが、本展示発表により多くの学会参加者が実際に体験できる。

6. おわりに

本稿では、以下の 3 つの特徴をもつ力覚デバイスについて述べた。**特徴 1**：力覚情報通信の遅延が 1ms 以下である。**特徴 2**：ヒステリシスを考慮した物理モデルをもつ。**特徴 3**：空中映像をつかんで操作できる。

今後の課題として、小型軽量化が挙げられる。モータを手の中に握る現在の方式では、モータ自体の重さが 200g 程度であるため、軽量化が困難である。我々は、携帯型の力覚デバイスに必要とされる性能を明らかにすると共に、必要最小限の性能をもつ 100g 程度の超小型力覚デバイスを開発する予定である。また、超大画面立体ディスプレイにおける利用や、全方向でディスプレイで囲まれた空間における利用も検討している。

謝辞 川島機械の川島光男氏には、弾性/塑性/脆性モデルを作成するうえで多大なご協力をいただいた。ここに、感謝の意を表す。また、本研究の一部は科研費基盤 B (21300088) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 中山功一, 井ノ上直己: 携帯型力覚提示デバイスの試作と心理実験による評価, 信学技報, Vol.108, No.378, CQ2008-62, pp.17-22 (2009) .
- 2) 中山功一, 井ノ上直己: 剛体把持感覚の提示に必要な力覚デバイスの性能評価, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 (力触覚の提示と計算研究会), Vol.001, No.HDC01, pp.33-36 (2008) .
- 3) PHANTOM 製品情報: <http://www.sensable.com/industries-haptic-gallery.htm>
- 4) 井上雅晴, 長谷川晶一, 金時学, 佐藤誠: 2 次計画法を用いたワイヤ駆動型力覚ディスプレイのための張力計算アルゴリズム, 日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文集, pp.91-95 (2001) .
- 5) 中山功一, 安藤広志: 携帯型把持感覚提示デバイスを用いた硬さ認知能力の検討, 信学技報, Vol.109, No.83, HIP2009-48, pp.1-5 (2009) .
- 6) 大西仁, 望月要: 力覚ディスプレイにおける遅延が弾性力の弁別閾に与える影響, 信学技報, Vol.106, No.495, CQ2006-81, pp.11-16 (2007) .
- 7) Wikipedia: <http://ja.wikipedia.org/>