

仮想物体への接触感提示を実現した ナイフ型対話デバイスの開発

Development of Knife Device Giving Virtual Tactile Sensation

田中和樹¹⁾, 木村朝子²⁾, 柴田史久²⁾, 田村秀行²⁾

Kazuki TANAKA, Asako KIMURA, Fumihisa SHIBATA and Hideyuki TAMURA

1) 立命館大学 理工学研究科 2) 立命館大学 情報理工学研究科

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Abstract: We have been developing “ToolDevice”, a set of devices to help novice users perform various operations in Mixed Reality (MR) space. ToolDevice imitates the familiar operational feedback that is used in everyday life, with one example being the KnifeDevice. However, it is difficult to say that the current KnifeDevice’s operational feedback resembles real-life sensation because it only provides fixed amplitude vibration as a tactile feedback. We developed a prototype device that changes its vibration amplitude to improve the tactile sensation of the KnifeDevice and evaluated the effectiveness through an experiment. Thus, we developed a new KnifeDevice using the result of the experiment.

Key Words: Mixed Reality, ToolDevice, Phantom Sensation, tactile sensation

1. はじめに

我々は、直観的に利用でき、複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間での作業に幅広く用いることができる対話デバイスとして、道具のメタファを利用した「道具型デバイス」の研究を行なっている[1]。道具型デバイスは、日頃慣れ親しんだ道具の形状とその道具ならではの触感・操作音を活用することで、ユーザに正しい操作イメージを与え、直観的な操作を可能にする。

道具型デバイスの 1 つであるナイフ型デバイスは、「切る」操作に特化した入力デバイスであり、仮想物体を机に配置し、物体の奥側で刃先を机に押し付け、手前に引き、刃先を机から離すことで仮想物体の切断を行うことができる[2]。このデバイスには触感や操作音を提示するために振動モータやスピーカを、ナイフの刃の部分にはタクトスイッチを内蔵しており、卓上面へ押し付けることでスイッチが入り、これを入力として切断操作の開始・終了を認識している。

我々は、ナイフ型デバイスを利用した木材加工システムを実装し、運用を行った。すると、切断操作時に刃の部分のタクトスイッチを卓上面に押し付ける必要があるため、弱い力で卓上面をなぞると切断できない、空中に配置された仮想物体をそのまま切断できないという点が問題として指摘された。また、仮想物体との接触時に振動モータで振動を提示しているが、提示される振動の大きさが一定であり、様々な形状の仮想物体に対して、十分な接触感を表現できているとは言えなかった。空中に配置された仮想物

体を切断する場合、刃先を押し付ける実対象が存在しない。そのため、触力覚提示機構といった何かしらの機構がなければ、接触したという感触すら得ることができない。

そこで本研究では、仮想物体の切断時に、現実世界での接触感に近いまたは類似した感覚を提示する機構を検討する。また、提案する機構の有用性を調べるためにプロトタイプを試作し、提案する 4 つの接触感提示方法を比較する実験を行なった。最後に、実験の結果評価の高かった手法を導入したナイフ型デバイスを開発した。

2. 関連研究

本研究では仮想物体との接触感を表現するために、道具型デバイスに導入可能な触覚フィードバック機構を検討する。田中らは切断操作時に刃に作用する力として、粘性抵抗、摩擦力、切断抵抗を表現するための手法や 2 種類以上の材質により構成される物体を切断する際の力覚提示方法を提案している[3]。しかし、同手法は力覚提示デバイスとして PHANToM を利用しており、ユーザの手の動きを拘束するため道具型デバイスには向いていない。ユーザの手を拘束せず、少数の振動モータで任意の場所に振動を提示できる方法として振動ファントムセンセーションという心理物理現象が von Békésy により発見されている[4]。これは、皮膚上の離れた 2 点に同じ大きさの刺激を同時に与えるとその中間に刺激を知覚し、刺激の大きさに差をつけると刺激の知覚位置が刺激の大きい方へ偏位するという現象である。久米らは、2 箇所に振動モータを搭載したデバイスを用いて、振動ファントムセンセーションに

より振動提示位置をデバイスの先端や後端に偏位させ、3次元空間での奥行き知覚を補助した[5]。本研究でもナイフ型デバイスの接触感を向上させるために、振動モータ2個による振動ファントムセンセーションを利用した触覚フィードバック機構の検討を行なう。

3. 仮想物体への接触感提示機構

3.1 切断操作時にデバイスに加わる力の分析

刃物による切断時には、ユーザが把持部に加える力や、刃が切断対象から受ける抵抗力が刃物に加わっている。金沢らは、刃物で物体を切断する際の力について述べている[6]。まず、切断方法には押し切りと引切りの2種類があり、引切りでは、刃物に対して水平方向に加わる摩擦力と上方への垂直方向切断力が加わっている。さらに垂直方向切断力は図1のように刃が切断対象から受ける力と刃の側面が切断面から受ける摩擦力（側面摩擦）の2種類の力の合計であると述べている。しかし、側面摩擦は、チーズや餅のような粘着性が高い物体ではとても大きい、木材や紙のような粘着性が低い物体では極めて小さく、無視できるものとなる。よって、本研究で扱う切断対象も粘着性が低いと仮定することで、刃に加わる力は図2のようになると考えられる。デバイスが切断対象を切断しながら進行方向に移動している時、ユーザが切断対象の表面に平行に加える力を P 、切断対象からデバイスに加わる切断時の抵抗力を F で表す。デバイスに対して垂直方向にかかる力はそれぞれ P_n と F_n となり F_n は刃にかかる切断力を、 F_f はデバイスの水平方向に加わる動摩擦力を表している。ここで、支点と作用点の距離を r_1 、支点と力点の距離を r_2 とすると、デバイスが回転しない時は力のモーメントが釣り合っている

$$r_1 F_n - r_2 P_n = 0 \quad (1)$$

と表すことができる。本研究ではデバイスが進行方向へ切り進む場合に、 P は F を超えるが、 P が大きくなるにつれてデバイスの移動速度が大きくなるのみで、進行方向に垂直に加わる力は変化せず、触覚フィードバックには影響しないものとする。

3.2 接触感提示モデルの作成

切断対象の仮想物体は材質が1種類であるため、切断操作時の F は常に一定の大きさであると仮定できる。この時 F_f は変化せず、 F_n はデバイスと切断対象の表面がなす角 θ とデバイスの垂直方向と切断対象の表面がなす角 ϕ を用いて次の式で表すことができる。

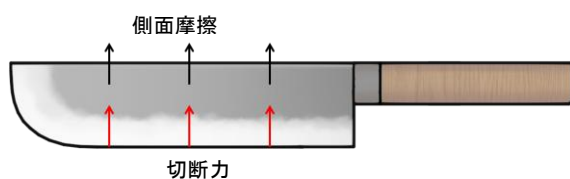


図1 垂直方向切断力

$$F_n = F \cos \phi \quad (2)$$

$$\phi = \pi - \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

ここで、切断中は常に P が F より大きい必要があり、式(1)～(3)より求められる。本研究では P の最小値、言い換えればデバイスが切断対象から受ける抵抗力の大きさを接触感として表現する。

式(1)～(3)より刃先と物体表面の接触位置が固定の場合、支点・力点・作用点が変わらないので F 、 r_1 、 r_2 が一定となり、 θ が大きくなるほど P は大きくなる。一方、接触位置が変化し、切断対象の表面がなす角 θ が一定である場合は、作用点の位置に応じて r_1 が変化するが F 、 r_2 、 θ が一定であるので r_1 が大きくなるほど P も大きくなる。以上より、 P を変化させる要素として θ と r_1 が考えられるので、これらの変化を接触感、具体的には振動の変化に利用する。

振動の変化に関して、振動の大きさ、振動の提示位置、振動の間隔などが考えられるが、振動の間隔に関しては振動を提示する時間、提示しない時間を振動提示モデルに当てはめることが難しいため、本研究では振動の大きさと振動の提示位置の2種類を用いる。

振動の提示位置を変化させる場合は2章で述べた振動モータ2個による振動ファントムセンセーションを用いる。一方、振動の大きさを変化させる場合は、上記2個のモータの振動の大きさを等しくすることで実現する。

3.3 プロトタイプ作成

前項の振動提示モデルを用いて振動を変化させるために、振動モータ（Linkman製、7AL09WA）を筒の両端2箇所搭載したプロトタイプ（全長227mm）を作成した

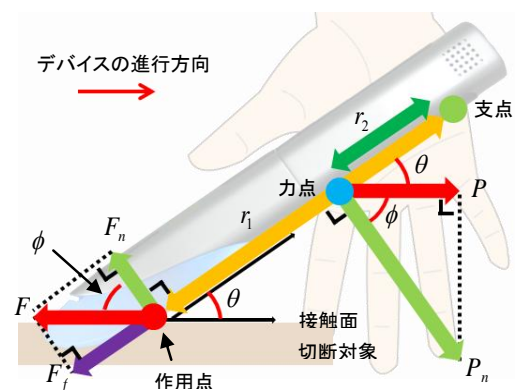


図2 デバイスに加わる力



図3 プロトタイプ

(図3). 振動モータは0~255の256段階で電圧を加えることができ、電圧が高いほど大きな振動が提示可能である。このプロトタイプを用いて20代の学生3名に対して予備実験を行なったところ、30以下の振動は知覚できないことがわかった。人間の手では全ての振動の大きさを正確には区別できなかったため振動の変化量を顕著にし、30~255までを15ずつに区切り、16段階で変化させることとした。また、2箇所の振動の大きさをそれぞれ M_1 , M_2 , 振動提示位置を X とし、それぞれの振動の大きさを16段階で変化させると、次式に示すように振動提示位置を16段階で変化させることができる。

$$M_1 = X \quad (0 \leq X \leq 15) \quad (4)$$

$$M_2 = 15 - X \quad (0 \leq X \leq 15) \quad (5)$$

3.4 振動提示方法

振動を変化させる要因である、切断対象とデバイスがなす角度、仮想物体との接触位置の2種類と、振動提示の種類として、振動の大きさ、振動提示位置の2種類を組み合わせた以下の計4種類を振動提示方法として提案する。

- (1) 角度に応じて振動の大きさが変化 (角度+大小)
- (2) 角度に応じて振動提示位置が変化 (角度+提示位置)
- (3) 接触位置に応じて振動の大きさが変化 (接触位置+大小)
- (4) 接触位置に応じて振動提示位置が変化 (接触位置+提示位置)

接触感提示モデルでは、 θ が大きくなるほど P が大きくなるので、 θ が最小の時に振動の大きさを0、 θ が最大の時に15となるように割り当てる。接触位置に関しては、作用点が刃の後端の時に振動の大きさを0、先端の時に15となるように割り当てる。

振動提示位置に関しては、 θ が大きくなるほど先端付近に力が加わるので θ が最大の時にデバイスの先端に振動を提示し、 θ が最小の時はデバイスの後端に振動を提示する。また、接触位置に応じて振動提示位置を変化させる場合は、振動の大きさ変化の場合と同様に、作用点が刃の先端の時にはデバイスの先端を、作用点が刃の後端の時にはデバイスの後端に振動を提示する。

4. 実験

4.1 実験目的

本研究では、提案する振動提示方法がナイフと仮想物体の接触感提示に有用であるか実験によって評価する。具体的には、仮想物体に対してナイフ(プロトタイプ)を押し付ける感覚、仮想物体の表面をなぞる感覚の2種類の接触感について、既存の振動提示方法に比べてどれだけ接触感が向上するかを比較、評価する。

4.2 実験環境

実験で用いるMRシステムの構成は図4に示す通りである。被験者はCanon社製のビデオシースルー方式HMD VH 2002を装着し、両眼立体視でMR空間を観察する。

被験者の頭部およびデバイスの位置姿勢推定にはPolhemus社製磁気センサLIBERTYを用いる。デバイスの振動モータの制御にはSparkFun Electronics社製Arduino Duemilanoveを用いる。

実験では、デバイスの先端付近に刃を示す赤い棒を重畳描画し、切断対象との接触部分には白い球を表示することで接触位置の把握を補助する。

4.3 実験内容

実験する接触方法は次の4種類である。(図5)

- (a) 平面に指定した角度(0°, 45°, 90°)で押し付ける
- (b) 角柱に差し入れた状態から平面をなぞる
- (c) 1つの角で構成される山をなぞる
- (d) 曲面をなぞる

これらの接触方法全てにおいて、基準(=3)となる振動提示方法(接触中に一定の大きさの振動を提示)を体験させた後、目的の振動提示方法を体験させ、接触感が向上したかを5段階評価(1:低, 5:高)で答えさせる。これを4種類の振動方法全てで行なう。被験者は20代の学生5名とし、振動提示方法は被験者ごとにランダムとした。

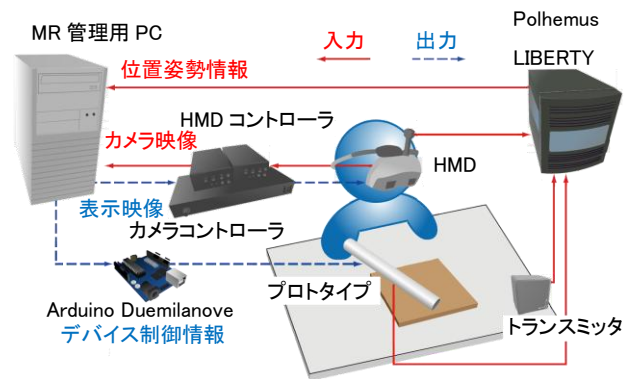


図4 システム構成

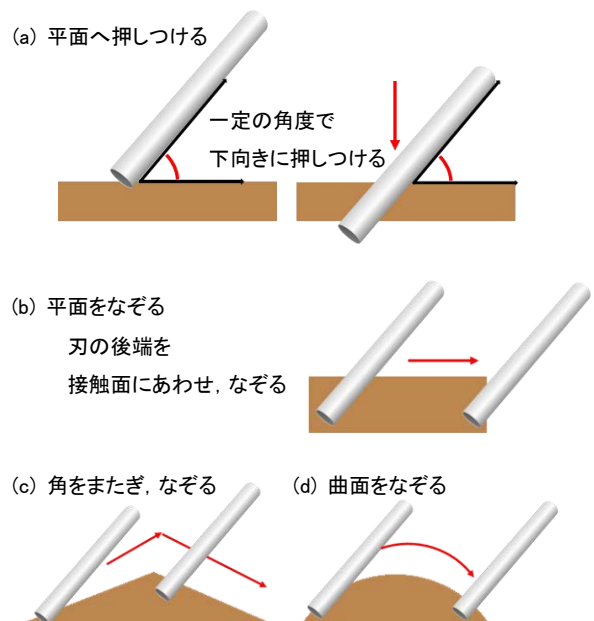


図5 実験で用いる接触方法

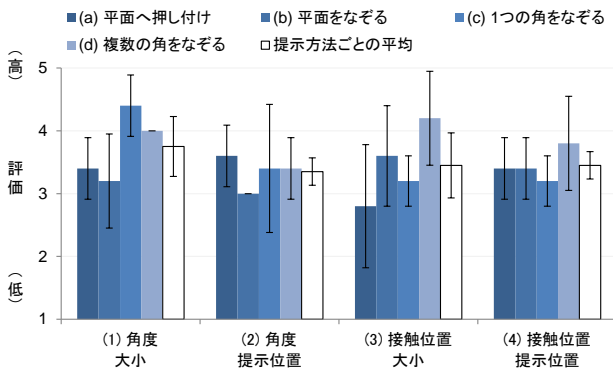


図 6 評価平均と標準偏差

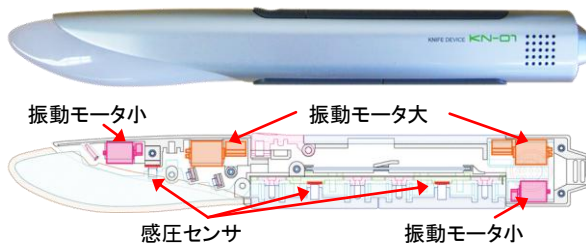


図 7 ナイフ型デバイスの外観（上）と内部構造（下）

4.4 結果と考察

5人の被験者の評価平均と標準偏差を図6に示す。縦軸は評価平均、横軸は振動提示方法ごとの評価結果である。これより、ほぼ全ての場合に、既存の振動提示方法よりも接触感が向上していることがわかる。最も評価が高かった手法は(1)の切断対象とデバイスがなす角度に応じて振動の大きさを変化させる方法で、接触方法(c)の時に最も評価が高く、角で振動が大きくなるので角がわかりやすいというコメントが多く得られた。一方、(3)の接触位置に応じて振動の大きさを変化させる方法では、(a)の時に基準よりも低い評価となった。これについては1人の被験者から、押し付けるほど振動が弱くなることに違和感を覚えたというコメントを得ており、本研究では引切りを想定しているので問題にはならないものの、押し切りには適さないことがわかった。その他、実験後に2人の被験者が振動位置の変化を単なる振動の大きさの変化と感じていたことがわかり、提示位置を変化させていることを伝えた後に再度体験させると、提示位置の変化を感じることができていた。これより振動提示位置の変化は、それを意識していないと知覚できない場合があることに留意する必要がある。

5. ナイフ型デバイスの再設計

5.1 触覚フィードバック機構について

再設計したナイフ型デバイスの外観と内部構造は図7の通りである。実験により提案した振動提示方法が有用であったため、256段階で振動の大きさを変更可能な振動モータを前後2箇所搭載した。さらに、振動の大きさに幅を持たせられるように、一回り小さい振動モータも前後2箇所搭載した。これにより、今後、計4個の振動モータを用いてより多くの振動変化を実現することができると考

えられる。

5.2 入力機構について

デバイスを卓上面に押し付けた際にタクトスイッチが硬く入力できない、空中では入力できないという問題を解決するためにデバイスの刃と把持部に感圧センサを搭載し、押し込みを0~255の256段階で入力可能にした。これにより卓上に押し付ける力が弱くても入力可能になり、空中ではデバイスの握りこみを入力に用いることで、空中での切断操作を可能にする。

5.3 ユーザスタディ

再設計したデバイスを用いて、先の実験において最も評価が高かった振動提示方法である、切断対象とデバイスがなす角度に応じて振動の大きさを変化させる方法(1)を導入し、学生3名に対して直方体や六角柱、球などの仮想物体を卓上、空中で自由に切断させ、使用感について意見を聴取した。その結果、触覚提示機構も入力機構も有用であることを確認した。

6. むすび

本論文ではMR空間で利用するナイフ型デバイスが仮想物体と接触、切断する際の接触感を提示する方法として、切断対象の表面とデバイスがなす角度や接触位置に応じてデバイスに内蔵された振動モータの振動の大きさや振動提示位置を変化させる方法を提案した。これらの方法を適用し、仮想物体にデバイスを押し付ける感覚、表面をなぞる感覚(平面、角、曲面)が既存のデバイスに比べて向上するか評価実験を行なったところ、全ての手法で接触感が向上することがわかった。そこで、この結果をもとにナイフ型デバイスを再設計し、最も評価が高かった振動提示方法である、切断対象の表面とデバイスがなす角度に応じて振動の大きさを変化させる方法を適用し、運用を行ない、有用性を確認した。今後は、切断対象の表面とデバイスがなす角度および仮想物体との接触位置など、振動を変化させる2種類の要素を組み合わせることや、大小4つの振動モータを利用することで、更なる接触感の向上を目指す。

参考文献

- [1] 上坂晃雅 他：“複合現実空間との対話操作のための道具型デバイス”，信学技報，Vol. 107, No. 427, PRMU2007-170, pp. 81 - 86, 2008.
- [2] 高見雄介 他：“複数の道具型デバイスを活用する複合現実型木材加工システム”，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol. 14, No. 2, pp. 141 - 150, 2012.
- [3] 田中厚子 他：“仮想切断作業における力覚の表現”，情報処理学会論文誌，Vol. 40, No. 7, pp. 2978 - 2987, 1999.
- [4] G. von Békésy: “Sensory Inhibition”, Princeton University Press, 1967.
- [5] 久米祐一郎 他：“3次元仮想空間内作業におけるファントムセンセーションを用いた奥行き情報提示効果”，映像情報メディア，Vol. 53, No. 9, pp. 1308 - 1314, 1999.
- [6] 金沢憲一：“刃物の切れ味とトライボロジー”，トライボロジスト，Vol. 50, No. 6, pp. 435 - 440, 2005.