

Traxion: 仮想力覚提示デバイス

暦本 純一*

概要. 仮想力覚を作り出す新しい触覚アクチュエータの構成について報告する. このデバイスは人間の振動刺激とその知覚の非線形な関係に基づき, 振動波形を制御することで押したり引いたりといった「力」を感じさせる. 既存研究と比較してアクチュエータのサイズや重量が非常にコンパクト (35.0 mm × 5.0 mm × 7.5 mm, 5.2 g) で, 力覚提示方向を迅速に変更することが可能である. 振動アクチュエータへの入力信号と, 実際にアクチュエータに発生している振動や加速度をレーザ測距装置で計測し, 仮想力覚の発生原因を解析した. 評価者実験の結果, すべての実験参加者が仮想力覚を感じることを確認した. 仮想力覚の強さを評価するために, 現実の錘と仮想力覚を比較する評価実験を行い, このアクチュエータが約 30 g の仮想力覚を作り出していることを推定した. 本研究は多様な場面でインタラクティブシステムに応用することが可能であると考えているが, 本論文では歩行者ナビゲーションと, DLP(Digital Light Processing) プロジェクター光による可視光通信で空中に力覚場を作り出す応用例についても報告する.

1 はじめに

触覚はわれわれが生活する上でとても重要な感覚である. 触覚として知覚することで, われわれは現実世界の物体の形状を把握し, 物体の操作を精密に, 正確に, そして素早く行うことができる. コンピュータなどの電子機器の操作においても, 触覚フィードバックを利用している研究事例は多い.

ここで, 触覚によるフィードバックを2つに分類する. ひとつめは力覚フィードバックと呼ぶもので, 実際に「力」を発生させるものである. 機構部品 (ロッドなど) により操作部に力を与えているもの [7, 9], ワイヤーにより力を与えるもの [5] などが提案されている. もうひとつは, 触覚ディスプレイあるいは振動フィードバックとよばれるもので, 力は発生させずに, フィードバックとして振動を利用するものである. たとえばタッチパネル上のボタンをタッチしたときに, クリック感を振動によって提示するものなどが提案されている [4, 11].

これらの二種類はそれぞれの目的・用途があり, また長所・短所がある. 力覚フィードバックは機構部品やワイヤーなどで固定物と接続する必要があり, 装置が大掛かりになってしまうので, モバイル用途などに適用することができない. 一方, 触覚ディスプレイでは本当の「力」を提示することができないので, 現実での力覚を再現するような用途には向かない. また, フィードバックとして用いる場合も, 利用者や操作部を特定の方向に導くために力の方向を利用することができない.

機構部品によらずに力覚を提示するいくつかの研究事例がある. 2ないし3個の偏心モーターによって慣性モーメントにより力覚を提示する装置を提案されている [14, 10, 3]. 雨宮らは刺激の認知の非

線形性にもとづき, 回転体とクランク機構によって非対称的な加速度パターンを生成し, 力覚が感じられることを示している [2, 16]. これらの研究により, 実際に物理的な力を発生させなくても, 知覚としての力覚の提示が可能ながわかってきた. しかし, 従来提案されている機構はいずれも回転体やクランク機構などの機械部品からなっており, 全体のサイズや重量の面で改良の余地がある. たとえば雨宮らのデバイスは単方向の力覚提示に 70 mm × 200 mm × 48 mm の装置を要し, 重量も 250 g であった [2]. これらを組み合わせるために, さらに重量が増すことが予測される.

回転体やクランク機構による力覚提示のもう一つの問題は反応性である. 回転方向を急に変化させたり逆転することは難しいので, インタラクティブなシステムにおいて力覚の量を迅速に提示することができない. クランク機構は, 構造上, 回転方向を逆にしても非対称な加速度のパターンは逆転しないので, 一次元かつ単方向への力覚提示しか行えない. 回転体ではモーターの回転方向を変えることで力覚の提示方向の変化が可能であり, 小型モーターによってアクチュエータの小型化も可能なが報告されている [10]. しかしモーターの回転を急激に停止・開始することは依然困難である.

本論文では, これらの問題を解決し, 従来よりも飛躍的に小型軽量化された仮想力覚提示デバイス, Traxion について報告する. Traxion の外形は 7.5 mm × 35.0 mm × 5.0 mm で重量は 5.2 g であり, 双方向一次元の仮想力覚を創り出すことができる. また提示方向を変化させるのに要する時間も数ミリ秒程度である.

2 Traxion の動作原理

Traxion はアルプス社のゲームパッド用振動アクチュエータ (Force Reactor [1]) の入力信号を制御す

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学大学院情報学環・ソニーコンピュータサイエンス研究所

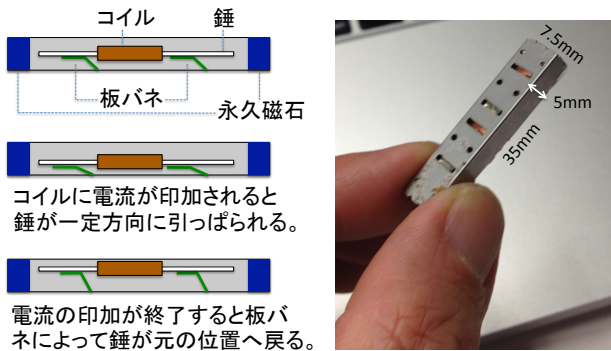


図 1. 振動子 (フォースリアクター) の構成

ることで仮想力覚を作り出している。Force Reactor は、コイルが板バネで支えられた振動体が格納されている。ケースの両端には永久磁石が設置されている (図 1)。この構造でコイルに電流を加えると磁界が発生し、コイルが一定方向に移動し、加速度を生み出す。印加を停止すると板バネによってコイルが元の位置に戻る。この構造をゲームパッドに組み込むと、様々な振動パターンを作り出すことができる。

実際にアクチュエーターに発生する加速度をレーザー測距装置 (キーエンス LK5000) によって測定した結果を図 2 に示す。指で保持した場合と、スポンジ、シリコン、ゴムの台上にアクチュエータを置き計測した場合を比較した。図では指で保持した場合と比較的加速度パターンが似ているスポンジ台での測定結果を示している。加速度計測周期は $50 \mu s$ である。

図 2(1) は、コイルに直流電圧を印加したときのアクチュエーターに発生する加速度である、印加後コイルの移動にともない加速度が発生し、それが減衰していく様子がわかる。信号の印加/停止を周期的に繰り返すことで定常的な振動を作り出すことができる。図 2(2) は 125 Hz の正弦波を、(3) は同じく 125 Hz の矩形波 (デューティー比 5:5) を加えた場合の加速度である。コイルに発生する磁界による運動と板バネによる減衰効果が組み合わさっており、周期運動ではあるものの、入力信号がそのまま単純には加速度変化に反映しているわけではないことが観測される。この (2) と (3) の場合、アクチュエーターを指で保持しても、振動は感じられるものの、力を感じることはなかった。

次に、アクチュエータにデューティー比の異なる矩形信号を印加してみると、仮想力覚が感じられることを発見した。図 2 (4) がそれで、周波数 125Hz でデューティー比 2:6 (2 ms on, 6 ms off) の信号を与えると、アクチュエータが一方向に引っばられるような力を感じるようになった。図からも明らかのように、このときアクチュエータが非対称な加速度運動をしていることがわかる。また、デューティー比を変化させることで、仮想力覚の方向も制御することがわかった。図 2(4) では下向きの力を感じ

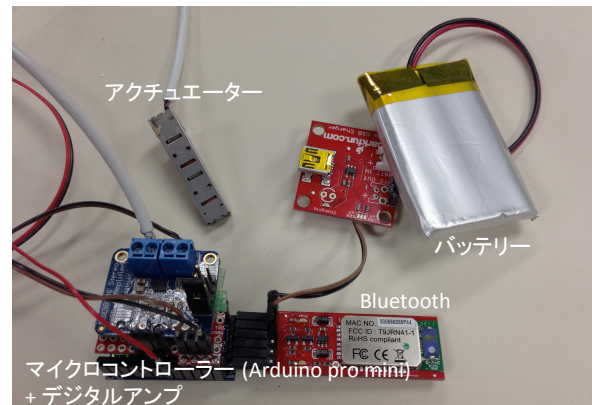


図 3. 試作システムの構成: マイクロコントローラー (Arduino) が Bluetooth 経由で命令を受信しアクチュエーター用の駆動波形を生成する。信号増幅にはオーディオ用デジタルアンプを利用している。

るが、(5) のデューティー比 6:2 (6 ms on, 2 ms off) では逆に上向きの力を感じる。以上の場合でも、コイルに印加された信号が単純に振動に反映されているわけではなく、コイルと板バネの効果が複合していることを指摘しておく。

ここで、仮想力覚の発生原因について考察する。アクチュエーターは外部と機構部や糸などで支えられている訳ではないので、振動加速度を一定時間積分すればその値はゼロになり、現実には力は発生していない。したがって感じられる力は人間の知覚機構によるある種の錯覚であると推定される。仮想力覚の発生原理については Stevens の幂法則 (Stevens's power law) [13] と呼ばれる、刺激とそれに伴う感覚の強さの関係によるものが仮説の一つである。Stevens の幂法則は、刺激 I による感覚の強さ S が $S = kI^\alpha$ となるというものである (ここで k は比例定数、 α は刺激の種類により決まる係数)。測定された加速度の積分値はゼロになるが、このようにして知覚された感覚 S の積分値はゼロにはならず、力として感じられるのではないかと推測している。仮想力覚の発生原因として考えられる他の要因は、刺激のマスク効果である。強い刺激の直後の弱い刺激がマスクされるという現象である。図 2(4),(5) では大きな加速度の直後に (反対方向への) 小さな加速度運動が連続しているので、この部分の知覚がマスク効果によって抑制されれば、やはり力覚を感じるようになる。

今回のデバイスでは、アクチュエーターをデューティー比の異なる矩形信号で駆動した場合に、コイルと板バネによる構成によりその駆動信号が変形された結果、力覚を感じる非対称な加速度を生み出していると推定される。

システム構成

本研究で利用しているシステム構成を図 3 に示す。駆動波形を発生させるマイクロコントローラー

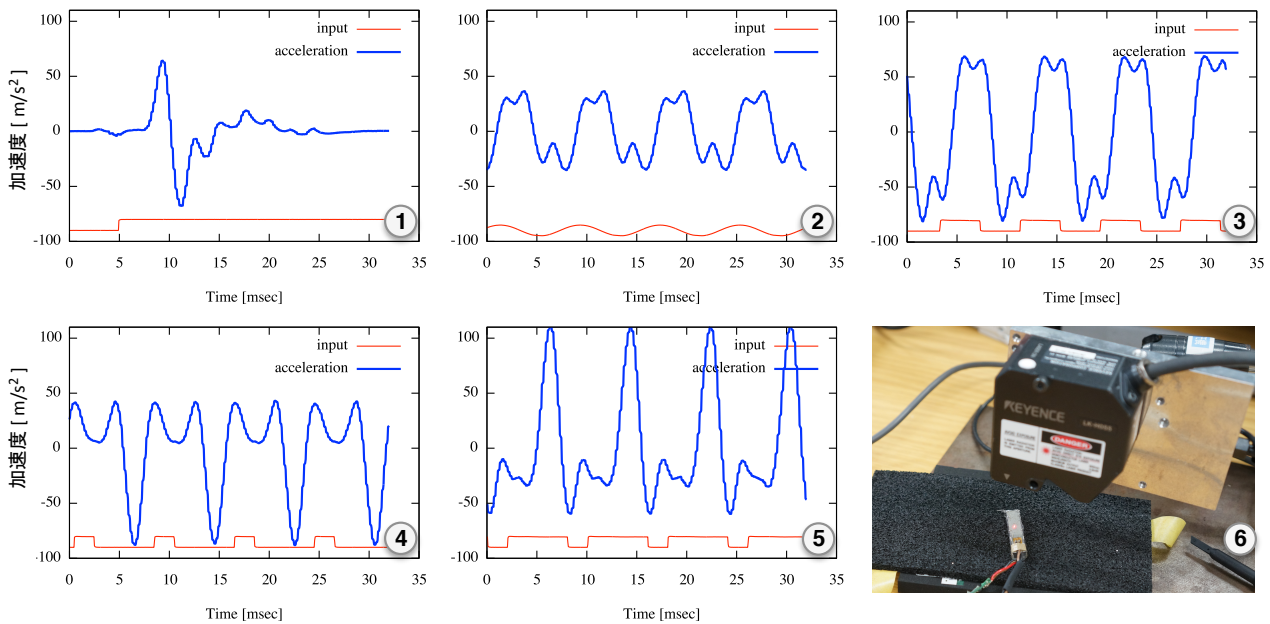


図 2. Traxion によって駆動される振動形状：デューティー比が異なる入力信号により異なる加速度が形成される。(1) 単一パルス印加と対応する加速度 (2) 正弦波 (3) 矩形波 (デューティー比 1:1) (4) デューティー比 2:6 (5) デューティー比 6:2 (6) 加速度計測環境

(Arduino) が Bluetooth 経由で指令を受け取りアクチュエーターを駆動する。信号増幅のためにオーディオ用デジタルアンプを利用している。前章の実験により、仮想力覚を発生させるための波形は矩形で充分なことが分かったので、マイクロコントローラーの出力端子 (0V/5V を切り替え可能) を直接オーディオアンプの入力端子に接続し、DA 変化を省略することで構成の簡素化を実現している。

3 評価

3.1 実験 1: 一次元仮想力覚デバイス

Traxion の効果を確認するために利用者評価実験を行った。実験参加者は 10 名で、全員コンピュータサイエンス関係学科の大学院生である。参加者はアクチュエーターを指で保持し、仮想力覚が感じられたときにその方向を回答する。アクチュエーターを駆動する時間は 640, 320, 160, 80, 40 ms で、正方向と逆方向の仮想力覚を作り出す 2 つの振動パターン (2 ms:6 ms と 6 ms:2 ms のデューティー比) との組み合わせを提示する。振動時間、振動パターンの組み合わせはランダムに選択されている。各参加者は、それぞれの振動時間に対して 5 回の刺激提示・回答のタスクを行う。回答はゲームコントローラーのスティックによって入力する。振動以外の情報を遮断するため、参加者はアイマスクとノイズキャンセルヘッドフォンを装着している (図 4:左)。

評価結果を図 4(右) に示す。グラフに示されているように刺激時間が短縮されると若干正答率が落ちるものの、いずれも高い正答率を示しており、この

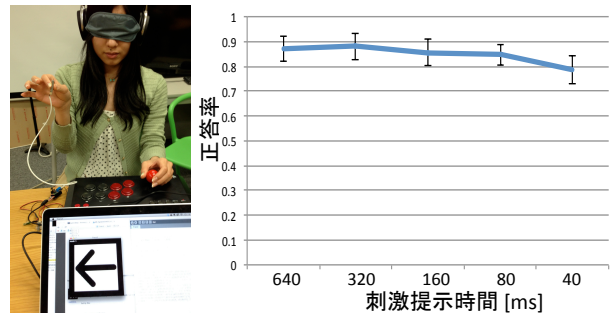


図 4. 実験 1: 一次元仮想力覚の評価実験環境および結果

仮想力覚が複数の実験参加者が同様に感ずる感覚であることが確認できた。

実験後のインタビューによると、多くの実験参加者が、指で保持しているアクチュエーターを動かしてみると仮想力覚をより明確に感じられるという意見が多く聴かれた。とくに力覚の方向にアクチュエーターを動かした時にこの効果は顕著だった。この効果に対する仮の説明は以下のようである。現実世界での牽引力、たとえばゴムやスプリングによるものは、牽引する方向に物体を動かすことで力が弱くなるものが多い。一方、仮想力覚の場合、移動させても感じられる力はとくに減らないので、それを「逆算して」元の力が強くなったと錯覚するのではないか、という可能性が考えられる。

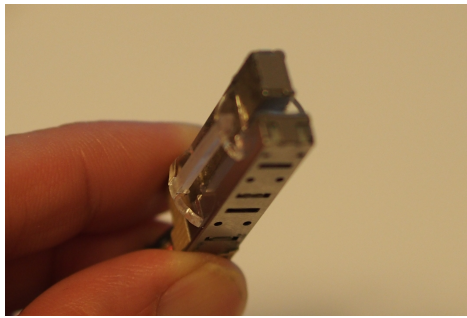


図 5. 2次元仮想力覚デバイスへの拡張

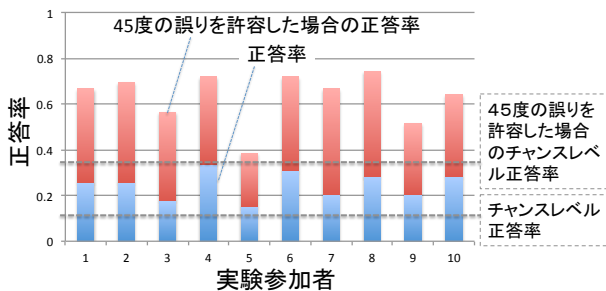


図 6. 実験 2: 二次元仮想力覚提示実験結果

3.2 実験 2: 二次元仮想力覚デバイス

次に、本デバイスを組み合わせることで多次元の仮想力覚が提示可能か検証した。図 5 のように、2つのアクチュエーターを、それぞれの牽引方向が直角になるように接合した。このデバイスで、同時に加速力覚を提示した場合に、その合成方向に力覚が感じられるかを評価した。

実験 1 と同じ 10 名が評価実験に参加した。アクチュエータを指二本で保持し、力が感じられた方向を答える。この実験では 45 度ごとに 8 方向からいずれかを回答するようにした。刺激提示の時間は 640 ms で固定し、デューティー比は 2 ms:6 ms を用いた。縦横方向の仮想力覚はどちらか一つのアクチュエーターをその方向の力覚が提示されるように駆動し、斜め方向は両方のアクチュエーターを駆動した。参加者は実験 1 と同様、アイマスクとノイズキャンセルヘッドフォンを装着し、ゲームスティックによって回答した。

この実験では、図 6 で示すように正答率はチャンスレベルを上回るものの、正しく力覚が感じられているとは言いがたい状況だった。複数のアクチュエーターを同時に駆動しても、全体の振動が斜め方向を力覚を感じさせるような振動としては合成されないことが主な理由であると考えているが、複合アクチュエータでの実際の振動の解析を今後実施する予定である。

3.3 実験 3: 仮想力覚量の推定

では、発生している仮想力覚の強さはどのくらいだろうか。これを評価するために実験 3 を計画・実施

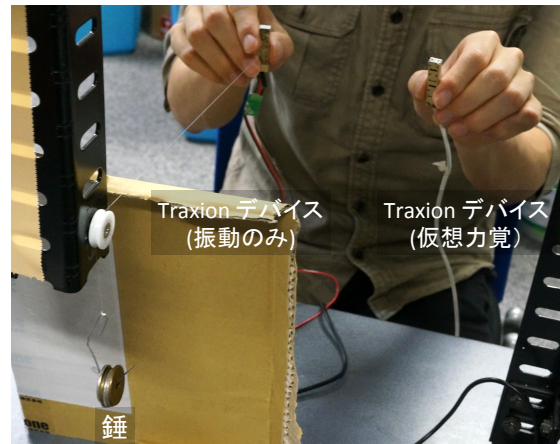


図 7. 実験 3: 仮想力覚量の評価

した。実験参加者は、仮想力覚を発生するアクチュエータと、振動はしているが仮想力覚が発生しないように印加信号を調整したアクチュエーターを両手で保持する。力覚が発生していないアクチュエーターにテグスと滑車を介して錘を取り付け、牽引力が発生するようにしている。それぞれのアクチュエーターを交互に駆動し、錘の重さを変え、ちょうど同じ位の牽引力だと感じたときの重さを記録する。実験参加者には、錘の重さを感じるために、それぞれのアクチュエーターをゆっくりと前後に動かすことをお願いした。

それぞれの錘に対して、「錘の方が重い／軽い／同じ位」と回答してもらい、同じ位と答えた値を実験結果として記録した。実験 1,2 と同じ 10 名が実験に参加した結果、平均値は 29.8 g (0.292 N) 標準偏差は 8.5 g (0.083 N) だった。この実験により、発生している仮想力覚がおおむね 30 g 程度であると推定される。

ただし、この実験条件の場合、片方の手は錘の重量を常に支えているが、仮想力覚は振動しているときしか発生しない。したがってこの二つを単純に比較して正しいかどうかは疑問が残る。今後実験条件を変更するなどして仮想力覚の推定精度を上げていきたい。

4 応用

4.1 方向の提示

仮想力覚は、歩行者を誘導するために有効だと考える。たとえば指輪型のアクチュエータに仮想力覚を発生させて、誘導した方向へ牽引することができれば、視覚情報によらず空間ナビゲーションができるかもしれない。また、たとえば物の位置を何らかの手段で認識できるとすると、その物に向かって指先を牽引するデバイスなどが考えられる。また視覚障害者のナビゲーション手段としても利用できるのではないかと考えている。

こういった位置誘導応用の可能性を検証するため

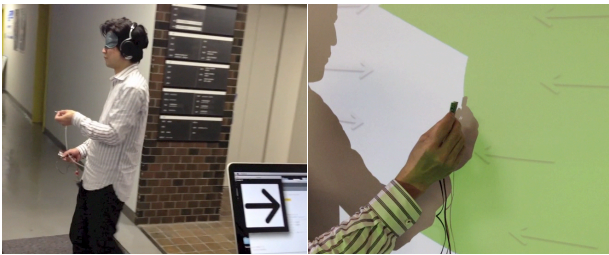


図 8. Traxion アプリケーション例: (左) 歩行者の誘導, (right) 仮想力覚つき入力装置. プロジェクターの照射によって力場を作り出す. DLP プロジェクターにより力の方向を光の点滅パターンとして照射する. 仮想力覚つき入力デバイスでその光をデコードし, 力覚に変換する.

に, 簡単な実験を行った. 利用者はアイマスクを装着し, 指で保持したアクチュエーターの牽引する方向に曲がるようにする. たとえば廊下の角に来た時に右に曲がるか左に曲がるかを仮想力覚によって支持する. 今回の実験では, 直進する場合には力覚は提示しなかった. また方向の支持はウィザードオブウォズ方式で, 実験参加者を目視して必要なナビゲーション支持をワイヤレスで与えるようにした (図 8(左)). 実験の結果, 視覚情報にたよらずとも歩行が可能で, 適切な場所で曲がれることが分かった.

4.2 仮想力覚つき入力デバイス

他の応用可能性として, 仮想力覚による入力デバイスが構想できる. もしスタイラスなどに仮想力覚を組み込むことができれば, アプリケーションによって牽引力や斥力を発生させることが出来る 8(右). 従来の力覚付き入力デバイスはスタイラス全体をロッドによって保持してため作業範囲に制約があったが, 仮想力覚ではその制限がない.

図の例では, 作業空間に力の場を動的に作り出している. DLP プロジェクターの照射光で力場を定義する. DLP プロジェクターは, 色ごとに光の点滅パターンが異なるので, 簡易な可視光通信装置として使うことができる. 入力デバイスのフォトトランジスターでこの点滅を受信し, 色ごとにことなった力の方向を発生させれば, プロジェクターで照射する図形によって力場を定義することができる [12].

たとえば, 手術をする際のメスの動きを仮想力覚によってガイドするような応用が考えられる. 患者の体表に力場をプロジェクションし, メスに光センサーと仮想力覚アクチュエーターを装備すれば, 切開すべき場所を力覚として感じるができるようになる.

5 関連研究

他の仮想力覚デバイスとの比較

前述したように, 回転体やクランク機構によって仮想力覚を生み出すデバイスが提案されている [14,

2, 3] が, 本論文が提案するデバイスと比較すると重量やサイズが大きなものとなっている. また, 回転体は急激に回転数を変化させたり逆転させることができない. このことにより, これらの装置では単方向の一定量の仮想力覚を作り出すことができても, その方向を逆転させたり, 力覚量を制御することが難しい. これに対して, 本論文で提案しているデバイスはより単純な構造ながら仮想力覚を提示することが可能で, 既存事例から大幅に小型軽量化されている (重量比で約 40 分の 1) 点が利点と言える.

また, [2] では評価実験の結果, 周期運動が 40 Hz 以上になると仮想力覚が消失していくことを報告している. しかし, 本論文のデバイスでは振動数が 150 Hz 付近でも安定して仮想力覚が感じられた. したがって従来の回転体に基づく方式と本研究の構成では仮想力覚の発生原理が異なっている可能性もある. これについては今後さらに精密な検証をすすめていきたい.

力覚によるナビゲーション

ActiveBelt はベルト状の装着型デバイスで, 複数のアクチュエーターの振動によって, 利用者を誘導することができる [15]. 上述のように, Traxion では方向を仮想力覚で提示することで, 利用者を特定の方向に誘導することを試みている.

力覚提示素子

触覚によるフィードバックは, タッチパネルに組み込まれたものが多く提案, 実用化されている [4, 11]. われわれが利用している素子は, ゲームコントローラー用に開発されたものである [1] が, 他の原理による力覚提示素子でも仮想力覚が発生するかどうかは興味深い課題である. ワイヤは機構を利用せずには触感フィードバックを発生させるものとしてアレイ状の超音波トランスデューサーによるものがある [6] が, 本論文で示しているような力覚をつくりだすものではない.

6 結論・今後の課題

本論文では仮想力覚を生成する触覚アクチュエーター Traxion について報告した. 振動子の駆動パターンを工夫することにより, 仮想的な「力」を生成することが可能になった. 評価実験によりこの効果を複数の利用者によって確認した. また, 仮想力覚の大きさも評価し, 約 30 g 相当の力が生成されていると推定した. このデバイスは既存事例の力覚装置と比較して重量比で約 1/40 であり, インタラクションデバイスとしての利用可能性が高まった.

仮想力覚は人間の刺激と知覚の関係に基づいて力覚を「錯覚」として感じさせるものであり, 物理的な力は発生していない. また, 従来の機構部品による力覚フィードバックのように, 利用者の行動を束縛するほどの大きな力を作り出すことはできない. 一方, 振動フィードバックとは異なり, 明確に力の方向を感じることができる. したがって, 従来の力

覚フィードバックとも振動フィードバックとも異なるタイプの触覚フィードバックだということができる。例えば、歩行者ナビゲーションで移動方向に牽引するアプリケーションを振動フィードバックで実現しようとする、「右」「左」などの方向を特定の振動パターンと対応づける必要があり、利用者がこの対応づけを記憶理解しなければならない。仮想力覚ではこのようなマッピングが不要で直接方向を感じさせることができる。

現状では既存の特定のタクトイルアクチュエーターの駆動パターンによって力覚が発生することを確認した段階だが、他の振動子でも同じ効果が発生するかどうかは興味ある課題である。実際、tactor [8]と呼ばれるコイル型の振動子でも力覚発生量は弱いながらも類似の仮想力覚が発生することを確認した。また、今回利用したアクチュエーターは、上下方向に非対称の構造を持っており、上方向の力覚と下方向の力覚の量が若干異なるように感じられる。今後は各種のアクチュエーターの駆動信号と加速度を計測し、仮想力覚の発生原理をより厳密に確認していきたい。

一方、評価実験の結果、一次元の仮想力覚デバイスを単純に組み合わせても、合成力覚を作り出すことができないことが分かった。これについても振動子の運動や加速度を解析し、可能性を探求していきたい。

アプリケーションとして、DLP プロジェクターによる可視光通信により、プロジェクションされた平面に容易に力場を形成できることを示した。これを仮想力場と呼ぶ。この発想を発展させると、各種のサーフェスコンピューティングにおいて、投影されている物体と現実のインタラクティブデバイス間に引力や斥力を作り出すようなインタフェースが可能になる。また、現実の物体に投影した場合には、その物体の解析結果と仮想力場が対応するような応用が可能になる。たとえば、サーモカメラで撮影した温度映像から、温度勾配を力覚として感じるようなインタフェースや、手術の際のメスの力覚によるナビゲーションなどが考えられる。

参考文献

- [1] ALPS. Alps Electric Press Release Force Reactor™. http://www.alps.com/e/news-release/2005/0608_01.html, 2008.
- [2] T. Amemiya, H. Ando, and T. Maeda. Phantom-DRAWN: direction guidance using rapid and asymmetric acceleration weighted by nonlinearity of perception. In *Proceedings of the 2005 international conference on Augmented tele-existence*, ICAT '05, pp. 201–208, 2005.
- [3] A. Badshah, S. Gupta, D. Morris, S. Patel, and D. Tan. GyroTab: a handheld device that provides reactive torque feedback. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 3153–3156, 2012.
- [4] M. Fukumoto and T. Sugimura. ActiveClick: Tactile Feedback for Touch Panels. In *CHI 2001 summary*, pp. 121–122, 2001.
- [5] Y. Hirata and M. Sato. 3-dimensional Interface Device For Virtual Work Space. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 889–896, 1992.
- [6] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda. Non-Contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound. In *Proc. EuroHaptics 2008*, Vol. 5024 of *LNCS*, pp. 504–513. Springer, 2008.
- [7] H. Iwata. Artificial reality with force-feedback: development of desktop virtual space with compact master manipulator. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(4):165–170, 1990.
- [8] T. Labs. Haptuator Mark II Product specification. <http://www.tactilelabs.com>.
- [9] M. Minsky, O. young Ming, O. Steele, J. Frederick P. Brooks, and M. Behensky. Feeling and seeing: issues in force display. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(2):235–241, 1990.
- [10] N. Nakamura and Y. Fukui. Development of Fingertip Type Non-grounding Force Feedback Display. In *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, pp. 582–583, 2007.
- [11] I. Poupyrev, S. Maruyama, and J. Rekimoto. Ambient touch: designing tactile interfaces for handheld devices. In *ACM UIST 2002*, pp. 51–60, 2002.
- [12] J. Rekimoto. SenseableRays: Opto-Haptic Substitution for Touch-Enhanced Interactive Space. In *CHI '09 extended abstracts*. ACM, 2009.
- [13] S. Stevens. On the Psychophysical Law. *Psychological Review*, 64(3):153–181, 1957.
- [14] Y. Tanaka, M. Sakai, Y. Khono, Y. Fukui, J. Yamashita, and N. Nakamura. Mobile Torque Display and Haptic Characteristics of Human Palm. In *ICAT 2001*, pp. 115–120, 2001.
- [15] K. Tsukada and M. Yasumura. Activebelt: Belt-type wearable tactile display for directional navigation. In *Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag GmbH, Oct 2004*, pp. 384–399. Springer, 2004.
- [16] 雨宮 智浩, 杉山 久. ”牽引力錯覚を利用した牽引式羅針盤による視覚障がい者の歩行誘導の評価”. *信学技報*, 109(27, WIT2009-43):215–220, 2009.