

パネル駆動型力覚提示タッチパネルとその力覚制御手法の提案

則枝 真^{†,‡}

佐藤 誠^{††}

近年、スマートフォンやタブレット端末にて、フリックやスクロールなど、指の移動操作が一般的になってきている。しかし、タッチパネルでは操作のフィードバックが表示のみであり、更には画面が指で隠れることから操作の確認が難しい。そこで、我々はタッチパネルの表面を水平方向に動かし力覚を提示するインタラクションシステムを開発した。ワイヤ駆動にて力覚を提示する装置を構成し、新しい制御手法を提案することで、実用的なサイズで安全な装置の構成と、安定で正確な力覚提示を実現した。本稿では、インタラクションシステムとその構成について詳細に説明する。

A New Haptic Touch Panel Display with Optimum Control Approach

SHIN NORIEDA[†]

MAKOTO SATO[‡]

Recently, flick and scroll operations are commonly used in smart phones and tablets. But, it is difficult to operate touch panel display system without haptic feedback on slide operation. Therefore we developed a new touch panel system with force feedback to horizontal direction on finger. This system is composed of wire based haptic system. We proposed a new wire controlling algorithm and we could achieve presenting a stable and accurate force feedback to user. We will explain in detail the configuration of this system.

1. はじめに

従来の ATM や券売機でのタッチパネル操作では、ボタンを選択するだけの入力操作が中心であったが、近年、スマートフォンやタブレット端末の操作では、フリック操作やスクロール操作など、タッチパネル上で指を移動する操作も一般的になってきている。

しかし、タッチパネルの操作では、タッチしている画面のコンテンツが指で隠されてしまい、更には操作による触覚フィードバックがないことから、指の下で何が起きているのかが分かりづらく、適切な操作ができていないかを確認することが難しい。

タッチパネル上のボタンを選択する操作では、振動により疑似的なクリック感覚を発生させることで触覚フィードバックを提示する研究もある。しかし、単純な振動だけでは、連続的な力覚を指に提示することができないため、タッチパネル上の指の移動に伴う操作フィードバックには適していない。

そこで我々は、タッチパネルの表面を水平方向に動

かすことにより、ユーザへ連続的な力覚を提示するシステムの開発を行なう。この力覚提示システムにより、操作フィードバックだけでなく、力覚による方向のナビゲーションの様にシステムからの能動的な力覚による情報提示も可能になる。

本システムでは、ディスプレイの表示面上に透明なアクリルのパネルである提示部を設置し、この提示部を4本のワイヤで水平方向に引張することで力覚を発生させる。

ワイヤ駆動の力覚提示装置は、機構部が簡素であり、ワイヤの伝達方向と長さを変えることによる設計自由度が高く、モータとその他の構成部品が干渉しないような部品レイアウトを構成できる利点がある。

しかし、提示部のパネルをワイヤで駆動し、力覚を発生させる本構成では、提示部が操作領域でもあるため、提示部のサイズを大きくとる必要があり、提示部の稼働領域が狭くなる。

従来から、ワイヤ駆動型の力覚提示装置では、任意の向きに力が提示不可能な領域が存在することが知られており、その境界での安定性の欠如が指摘されている。本提案装置では、稼働範囲が狭いことにより、この問題がより顕著にあらわれる。

本論文では、システムの課題を詳細に記載するとともに、課題を解決する安定で正確な力覚提示を可能にする新しい張力分配計算手法を提案し、水平面方向への操作に伴う力覚を提示するシステムを構築する。

[†] 日本電気株式会社 情報メディア・プロセッシング研究所
Information and Media Processing Laboratories, NEC Corporation

[‡] 東京工業大学大学院 総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

^{††} 東京工業大学 精密工学研究所
Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of
Technology



図1 パネル駆動型力覚提示タッチパネル

2. パネル駆動型力覚提示タッチパネル

本研究で提案するワイヤ駆動の力覚提示装置は、ディスプレイ表示画面の前面に透明なアクリルのパネルである提示部があり、この提示部を4本のワイヤで水平方向に引張ることにより、画面上の水平方向への移動操作に伴った力覚を発生できる。

今回作成したコンテンツでは、エアホッケーの様にユーザは画面内の仮想オブジェクトであるボールを跳ね返すことができ、指に力覚を感じることができる。

この時、ユーザは衝突した際の衝突感だけでなく、衝突の方向も含めた力覚情報を受け取ることができる。

本装置では、ワイヤを介し力を伝達させるため、伝達方向と長さを自由に設計することができ、パネルの裏側に設置するモータとの駆動伝達部を簡素に構成できる。モータの設置場所もその他の構成部品が干渉しないようにレイアウトを構成可能であるため、実用的なサイズで力覚提示装置が構成可能である。

提示部のアクリルパネルはディスプレイ全体を覆っており、アクリルパネルの端や力を伝達するワイヤを筐体前面のフロントベゼルの裏に隠すことにより、ユーザが直接触れることがなく安全である。また、ディスプレイ全体が力覚を提示するため、ユーザはディスプレイのどこを触っても力覚を感じられ、使用時に提示のための器具を指に装着するような負担もない。

しかし、提示部のアクリルパネルはディスプレイ全体を覆う分、提示部が動作できる範囲はフロントベゼルの幅だけである。また、本装置では、複数のワイヤ引張の合力により提示力を発生させるが、提示部のサイズが大きいため、提示部の位置に依存し、ワイヤが引張る角度が大きく変化するため、提示部の位置に応じた正確な提示力の算出手段が必要である。また、提示部が面であるため、ワイヤ張力のバランスによって提示部が回転してしまう恐れがある。

そこで本システムでは、提示部の位置を考慮し、正確な提示力で並進方向への力覚のみ発生させるための張力分配計算手法を提案する。本計算手法では、各モータのエネルギー量を最小とする線形な最適計算法を用いており、正確な力覚提示が可能のほか、提示部の位置に関わらず安定な動作が可能である。

以上から本システムの特徴と効果をまとめると

- ワイヤ駆動の構成により、提示部を簡素に構成し、実用的なサイズで力覚提示装置を構成可能。
 - ワイヤや提示部などの機構部分を端末内部に内包し安全であり、器具を指に装着する負担もない。
 - 新しい張力分配計算手法により、安定で正確な力覚提示とモータエネルギー消費の最適化を実現。
- の3点を挙げることができる。

3. 関連研究

従来研究として、タッチパネル操作における振動による触覚フィードバックの研究が複数ある。Active Click^[1]では振動周波数を可変させクリック感を表現している。また、TactilePanel^[2]では振幅を制御しパネルを前後に振動させ押下感を表現している。振動によりクリック感や押下感を発生させる触覚フィードバックは、ボタンを選択する操作において有効であるが、単純な振動では、連続的な力や力の向きをユーザに提示することができない。

力覚を提示するタッチパネルとして TactileDriver^[3]がある。タッチパネルとディスプレイ全体をモータで駆動し、力覚フィードバックを実現しているが、押し込み方向の提示であることから、本想定のような画面上での移動に伴う操作フィードバックとしては適していない。また、タッチパネルとディスプレイ全体を動かす必要があるため、装置が大きくなり、大きな力を発生させることが難しい。

ディスプレイ前面のシートを動作させる研究として、井上ら^[4]は半透明な柔軟シートのバイアス張力を制御することで、シートの法線方向のコンプライアンスを可変させている。また、繁田ら^[5]は同様に柔軟シートを引張り接触面積の変化させることで硬さを表現している。いずれもディスプレイ前のシートを動作させる点で本構成に似ているが、どちらも触った際の硬さを表現しており、本システムの目的である水平方向の力覚提示とは異なる。

ディスプレイ前面の提示部を水平方向に動作させ力覚提示を行なう研究として、嵯峨ら^[6]は、なぞり動作に対応させた凹凸感を表現するのに、提示部を水平方向に動作させ剪断力を提示している。彼らの動作シス

テムは SPIDAR-mouse^[7]を利用しており、ディスプレイの表示面上に提示部があり、提示部をワイヤで引張することで力覚提示を行なう。ディスプレイ前面の提示部を水平方向に動作させる構成は同じである。ただ、提示部のサイズは小さく指一本が収まる程度しかないため、コンテンツを操作する際に、必ず最初に提示部を触りに行く必要があり、ATM の数字入力のようなタッチパネル上の任意の位置を触るシーンにはそのまま応用できない。提示部を指に装着することも考えられるが、装着自体がユーザの負担になる。また、提示部を引張するワイヤがむき出しであり、実用上のシステムとして利用するにはワイヤに指が引っかかるなどの課題がある。また、提示部の位置を考慮した張力の分配計算がなされていないため、正確な提示力と方向が提示できない。そして最適化された張力の分配計算ではないことから、エネルギーの消費量も大きい。

一般的な SPIDAR の張力分配計算手法^[8]では、提示部の位置を考慮し、エネルギー消費が最適化された計算がなされている。また長谷川ら^[8]は、ワイヤによる張力は引張る向きにしか力覚が提示できないことから、提示部の位置に依存して、任意の向きに力が提示可能な領域と不可能な領域が存在することを指摘している。彼らの張力分配計算手法では、その境界面において急激に張力が変化してしまう安定性の欠如を課題として挙げ、張力の連続性を保つための重み関数を設定することによりこの問題を回避している。しかし、連続性を保つための重み関数を計算に用いることは、提示力を正確に算出できない新たな課題も生み出しており、連続性と正確性を同時に満たすことはできていない。

4. システム構成

ユーザがディスプレイに表示した画像コンテンツにタッチすると、本システムは、指の位置をタッチセンサで検出し、指位置と画像コンテンツとを連動させ、ディスプレイの前面にあるアクリルパネルである提示

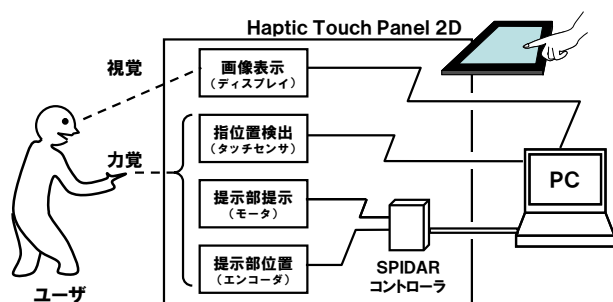


図2 システム構成

部を水平方向に動作させることにより、ユーザに力覚を提示するインタラクションシステムである。

本システムは、タッチパネル型の力覚提示装置であるハードウェアと、力覚を提示させるためワイヤ張力分配計算手法である触力覚提示制御を中心とするソフトウェアとにより構成する。

4.1 ハードウェア構成

本装置は4層のハードウェア構成により説明することができ、タッチ位置検出部、力覚提示部、画面表示部、ベース部により構成する。全ての構成を含んだ端末筐体サイズは320×256×38[mm]である。

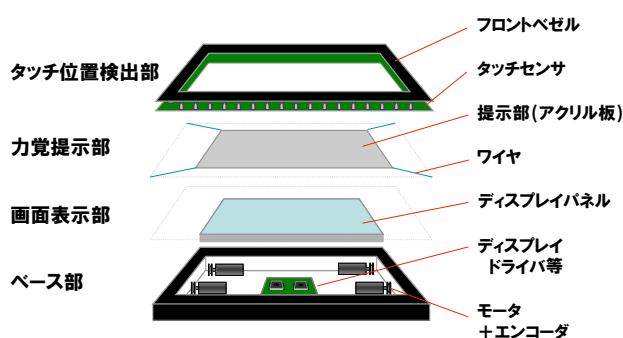


図3 ハードウェア構成

4.1.1 タッチ位置検出部

ユーザがタッチした指の位置を光学式のタッチセンサで検出する。ミナトエレクトロニクス社製の赤外線遮断検出方式のタッチセンサ TD-100UF-6 であり、25[fps]でタッチ位置検出を更新している。タッチセンサはフロントベゼルで覆われる位置に配置してある。

4.1.2 力覚提示部

ユーザが直接タッチする部分が提示部であり、提示部は傷が付きにくい表面硬化された透明のアクリル樹脂である。四隅を4本のワイヤで引張し、水平方向に動作することでユーザに力覚を提示する。各ワイヤを、筐体の角部分のプーリを介してモータで巻き取ること



図4 ワイヤによる張力伝達機構

提示部は稼働領域内で最大に動いた時でも提示部の端部分が出ないようにフロントベゼルの裏に隠れる構成になっており、提示部の端で指が挟まれるなどの危険がない。ワイヤを引張する筐体角部のプーリによる矩形内部が、提示部の稼働領域であり、提示部のサイズを差し引いた範囲、長手方向：52[mm]、短手方向：40[mm]の間で移動できる。

4.1.3 画像表示部

画像表示を行なうディスプレイパネルでは、その上を提示部がスライドすることで力覚を発生させる構成になっている。しかし、ディスプレイパネルにはパネルの端やパネルベゼルがあるため、各部の厚みが異なり段差が生じてしまう。そこで、その前面には表面を平面にするためのアクリルパネルが更に設置してある。ディスプレイパネルのサイズは 11.3[int]である。

4.1.4 ベース部

筐体のベース部分には、ワイヤを引張するためのモータの他、ディスプレイドライバ、モータドライバといった制御部が配置してある。

モータは maxon 社製 DC コアレスモータ RE-max17 であり、29:1 の減速ギアにより連続的に 22.7[N]の強い引張力を発生できる。また、エンコーダによりワイヤの長さを計測し、提示部の位置を算出する。

モータドライバには SPIDAR のコントローラである SpidarAHS を使用している。利用しているのは PWM による各モータの発生力の制御のみであり、提示部の位置及び目的となる提示力を発生させるための張力分配計算手法は後述するソフトウェア構成にて算出している。

4.2 ソフトウェア構成

本ソフトウェアでは、指の位置と提示部の位置を検出する検出処理と、タッチした指と情報コンテンツとの連動させるコンテンツ連動、力覚を提示させるためワイヤ張力分配計算手法である触力覚提示制御の3つで構成する。

4.2.1 検出処理

ユーザの指位置をタッチセンサで検出し、提示部の位置をワイヤの長さを計測するエンコーダ値から算出する。提示部の引張する各ワイヤの長さを $l_1 \sim l_4$ とすると、提示部の位置 (x, y) は、提示部のサイズ h, w と筐体の角部分のプーリ間のサイズ H, W とにより幾何的に算出できる。

4.2.2 コンテンツ連動

本論文ではコンテンツとして、エアホッケーの様にユーザが画面内のマレットと呼ばれる仮想オブジェクトに触り、ボールを跳ね返すことで力覚フィードバッ

クを得るアプリケーションを構成する。

コンテンツの動作は、三次元の物理シミュレータである ODE(Open Dynamics Engine)で構成される。複数のボールとボールを打ち返すためのマレットと外壁を配置し、タッチパネルで指示する位置にマレットを動かし、ボールや外壁に接触した際にマレットにかかる力を提示力として算出する。

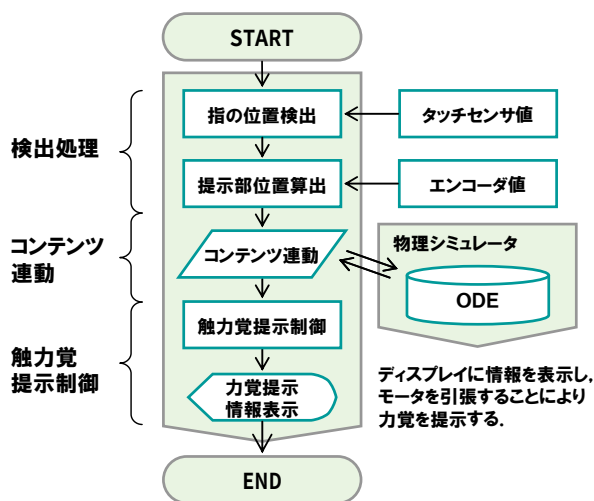


図5 処理フロー

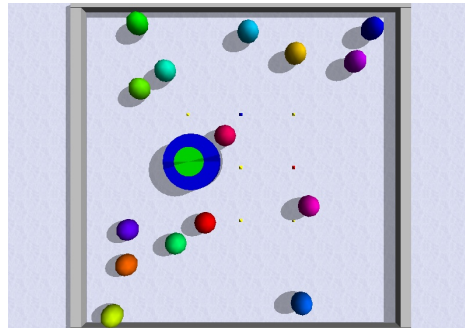


図6 コンテンツ画面

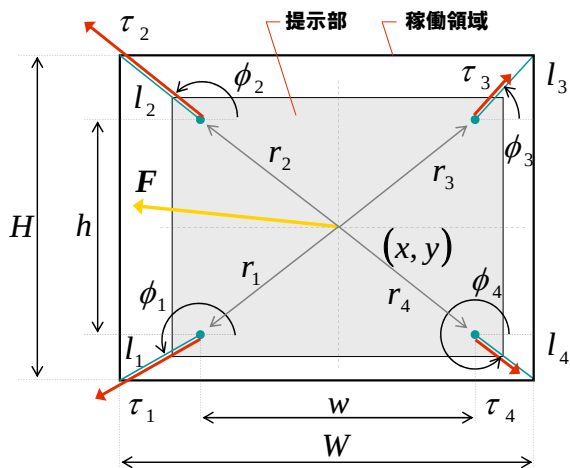


図7 張力分配計算のための条件

4.2.3 触力覚提示制御

触力覚提示制御では、目的の提示力を出力するために、4本のワイヤの引張力を算出する張力分配計算を行なう。コンテンツとの連動により算出した提示力を F とし、各ワイヤの張力を $\tau_1 \sim \tau_4$ とすると、提示力 F を満たすワイヤの張力の組合せは複数存在する。

そこで本論文では、モータの出力エネルギーを最小化することを目的に、最適化計算手法の1つである、線形計画法で各ワイヤの張力を算出する。各ワイヤの張力の線形和を最小化することを線形計画法の目的関数として設定し計算を行なう。

$$\text{目的関数: } \min : J = \sum_{i=1}^4 \tau_i \quad (1)$$

次に、提示力を正確に提示することと、提示部がワイヤの張力により回転しないようにすることを張力の分配計算として考慮する。これは、各ワイヤの引張する合力と提示力と一致させること、各ワイヤの引張による提示部のモーメントが必ず0になることを線形計画法の制約条件として設定することを意味する。提示部のワイヤ接続部分を始点とするワイヤの向きを表す単位ベクトルを ϕ_i とし、提示部の中心からワイヤの接続部分までのベクトルを r_i とする。

$$\text{制約条件: } \sum_{i=1}^4 \tau_i \phi_i = F \quad (2)$$

$$\text{制約条件: } \sum_{i=1}^4 r_i \times \tau_i \phi_i = M = 0 \quad (3)$$

最後に、ワイヤが弛むことを防ぐためにモータには必ず一定以上の引張力を与えておく必要があるため、制約条件として設定する。

$$\text{制約条件: } 0 < \tau_{\min} \leq \tau_i \quad (4)$$

また、モータには出力できる引張力の限界があるが、この条件については、制約条件としてではなく、最適化計算後の計算結果から、最大引張力を超える張力が算出された際、最大張力値に修正する処理を行なう。

$$\text{if: } \tau_i < \tau_{\max} \quad \text{then: } \tau_i = \tau_{\max} \quad (5)$$

また、提示部が稼働領域外に出る際には、計算解が存在しなくなるため、提示部の位置を稼働領域の直線上に射影して、本張力分配計算を行なう。

本論文の触力覚制御では、目的となる提示力を発生させるための各ワイヤの張力を算出する張力分配計算手法として、線形計画法を用いた。以上の制約条件、目的関数を設定し最適化問題を解くことにより、効率的なエネルギー消費量で、正確な提示力を提示するための各ワイヤ張力を算出できる。

5. 課題

ワイヤ駆動の力覚提示装置の場合、ワイヤによる張力は引張する向きにしか力覚が提示できないことから、提示部の位置に依存して、任意の向きに力が提示可能な領域と不可能な領域が存在する。

更に、本構成では提示部が「点」ではなく、ディスプレイ全体を覆う大きな「面」である他、提示部の端やワイヤを筐体前面のフロントベゼルの裏に隠す構成であることから、提示部の稼働領域が狭く、任意の向きに力が提示不可能な領域が多く存在してしまう。

任意の向きに力が不可能な領域に、提示部の一部が侵入すると、正確な力覚が提示できなくなるため、各ワイヤの張力が不連続に変化し、提示部が発振する不安定な状態になってしまう。その上、任意の向きに力が提示可能な領域と不可能な領域との境界は、提示力に依存し一定ではなく、事前に定義することは難しい。

例えば、正面右方向に提示力 F を発生させる場合、提示力、モータの最大・最小張力に依存し、任意の向きに力が提示不可能な領域は、図8のような領域となる。

そこで、提示部が任意の向きに力が不可能な領域を事前に定義できない条件下において、その領域内へ提示部が侵入した場合でも、各ワイヤの張力の連続性を保つ、安定した制御を行なえることが必要である。

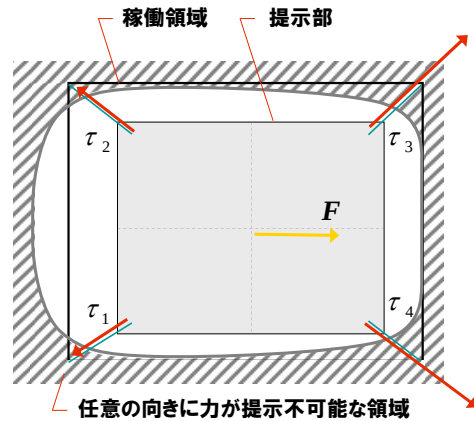


図8 提示不可能な領域を示した図

6. 本制御手法での対応

4.2.3 で提案した張力分配計算手法の場合、まずは最大引張力を制約条件として扱わないことにより、任意の向きに力が提示不可能な領域に侵入した際にも、稼働領域内であれば、連続した張力を算出可能である。

提示部が稼働領域外に出る際の張力の連続性を保つ対応もなされているが、本装置の場合、提示部の稼働領域である筐体により外側に出ることはなく、各ワイヤは常に連続した張力を出力し安定である。

7. 実験及び考察

7.1 実験目的と方法

提案した張力分配計算手法により，正確な力覚提示が算出できていることを検証し，任意の向きに力が提示可能な領域と不可能な領域との境界を提示部が移動する際，各ワイヤの張力が連続であり安定性を保つことができているかを検証する．

図で示すように筐体の稼働領域の中心を基準に，提示部を y 方向一側 5[mm]のところを x 方向に移動させる条件下で，各ワイヤの張力と提示力を算出する．目標となる提示力を x 方向 +2[N]とし，ワイヤの最小張力を 1[N]，最大張力を 20[N]とした．

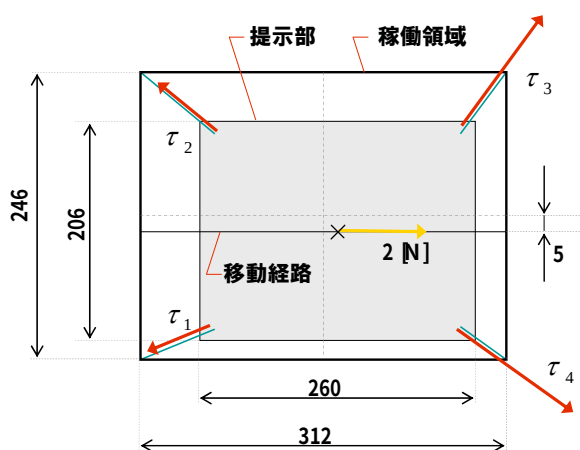


図9 実験条件

7.2 結果及び考察

提示部の中心位置を稼働領域の中心に対する相対位置で表わした際の各ワイヤの張力と提示力を図に示す。稼働領域の幅と提示部の幅を差し引いた，提示部が動ける稼働範囲は±26[mm]の間である．

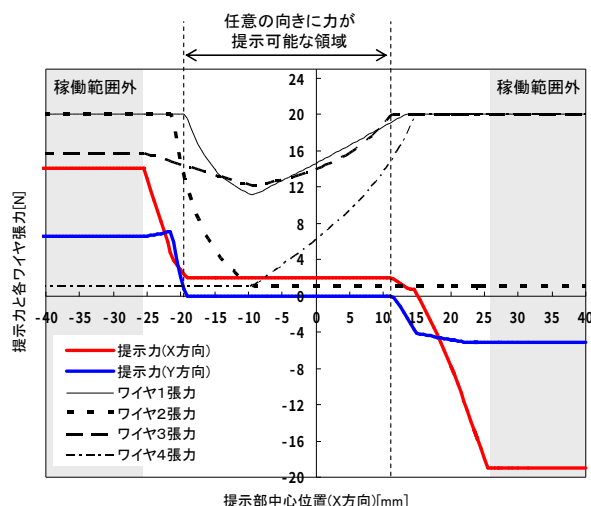


図10 提示力と各ワイヤの張力算出値

図を参照すると，この実験条件下では，任意の向きに力が提示可能な領域と不可能な領域との境界は-19[mm]と 11[mm]のところにあり，境界の内側では目的の提示力である x 方向 +2[N]を正確に算出できている．

また，境界を超える際にも各ワイヤは連続した張力変化をしており，安定していることが確認できる．

8. おわりに

ユーザがタッチパネル上で指を移動させる際，水平方向に連続的な力覚を提示するシステムを開発した．

ワイヤ駆動にて力覚を提示する装置を構成し，新しい制御手法を提案することで，実用的なサイズで安全な装置の構成と，安定性・正確性・効率性を兼ね備えた力覚提示を実現した．

エアホッケーの様に指でボールを跳ね返すコンテンツを作成し，力覚を感じることができるシステムの動作確認を行なった．

参考文献

- 1) 福本雅朗, 杉村利明, “タッチパネルにクリック感を付加できる ActiveClick”, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2001, No.5, pp215-216, (2001).
- 2) 赤羽歩, 村山淳, 山口武彦, 寺西望, 佐藤誠, “触感提示機能を持つタッチパネルのための押下感生成信号の検討”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.591-598, (2006).
- 3) 星野剛史, 塚田有人, 峯元長, “Tactile Driver: 触感を忠実に再現するタッチパネルシステム”, 第10回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2002), 日本ソフトウェア科学会, (2002).
- 4) 井上健司, 上杉麗子, 笹間亮平, 新井健生, 前泰志, “柔軟シートを用いたハプティック・デバイスによる可変コンプライアンスの提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.295-302, (2003).
- 5) 繁田悠, 黒田嘉宏, 鍵山善之, 井村誠孝, 大城理, “柔軟シートの張力制御による視触覚タッチパネル”, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, vol.001, HDC04, pp.19-22, (2010).
- 6) 嵯峨 智, 出口 光一郎, “タッチパネルインタフェースにおける剪断力による 2.5 次元触覚提示についての検討”, 日本バーチャルリアリティ学会研究, 第5回研究会, (2010).
- 7) 五十嵐 達郎, 一色 正晴, 林 理平, 劉 宇, 赤羽克仁, 佐藤 誠, “Spidar-mouse の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会, 第15回大会論文集, (2010).
- 8) 長谷川 晶一, 井上 雅晴, 金 時学, 佐藤 誠, “張力型力覚提示装置のための張力計算法”, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, pp.1-6, (2004).