

氏 名	ちょう しん 張 振
本 籍（国 籍）	中国
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	工博 第301号
学位授与年月日	令和元年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科電気電子・情報システム工学専攻
学位論文 題目	Fingertip Haptic Rendering: A Study of Wearable Cutaneous Tactile Devices Using Multi-Point Displaying Method (指先における感覚提示：多点提示手法によるウェア ラブルな皮膚触覚提示デバイスに関する研究)
学位審査委員	主査 教授 萩原 義裕 副査 教授 永田 仁史 副査 准教授 木村 彰男

論 文 内 容 の 要 旨

Haptic feedback provides many opportunities to interact with surroundings from a remote or virtual scene. Using haptic technology, we can explore unknown space, rescue in emergency situations and also can apply for entertainment. Recent developments in the human-computer interaction field have increased the interest in virtual interaction on the part of researchers working to realize more realistic sensations for interactions with virtual objects. Since humans generally use their fingers to feel things, the concept of “fingertip haptic” was also proposed. At this stage, most existing devices were proposed through a specific purpose and through the following five methods to generating fingertip haptic: (1) vibration can create collision sensation; (2) skin-stretch can enhance stiffness sensation; (3) platform-extruding and (4) pneumatic-airbag-extrusion can simulate gravity sensation; (5) shape-displaying can bring abundant tactile information. Most of the devices using above methods treat the cutaneous interactions as a point force rather than as distributed sensations. Although there existing some devices which can reproduce the distributed sensations, the capabilities of these devices in rendering execution are limited because they have low detection range with a large volume. This

research mainly aims at the deficiencies of the existing tactile interaction devices, to designing and developing novel tactile feedback devices with reasonable transmission methods.

In this dissertation, we analyzed the existing tactile rendering methods and found that shape-displaying method is the best to bring abundant information and can provide user with distributed sensations. We proposed two novel wearable tactile feedback devices combined the shape-displaying method with hydraulic transmission and flexible tendon-driven transmission, respectively. We gave a detailed discussion of them structures and control methods. The hydraulic transmission tactile feedback device using a 3×3 tactor array arranged in grid and pure water as the transfer medium to transmit kinetic energy in flexible tube leads to a compact structure with high performance on transfer of force. The flexible tendon-driven transmission device using flexible transmission system, implementing tendons drive 16 individual Pogo pins, arranged in a 4×4 grid as tactors, allows the stable displacement control in a distance. This leads to a high performance on virtual surface reproduction. We separate the drive unit from the actuators addressed the ergonomic constraints on previously device and more suitable for tactile feedback. Easy connectivity and separated design of driving part and rendering part allows the user's hand operation more flexible. Compared with existing similar distributed tactile feedback devices, these two devices both have large amplitude and a variety of surface shapes can be presented. This dissertation is divided into 7 sections. The summary of each section describes as follows.

Section 1 is the introduction, which include the background, objectives and research frameworks. Firstly, we analyze the research status and future research directions of tactile feedback devices. Next, we summarize the implement methods of tactile feedback device, and found that shape-displaying method is the best to bring fingertip haptic. Finally, the significance and propose of this research are clarified, the research framework is established, and the outline of this dissertation is described.

Section 2 describes the design of the cutaneous force feedback system using hydraulic transmission. By analyzing the main factors in designing and using hydraulic transmission method to separate the 3×3 tactor-array module and driving unit to increase the portability of the device. We gave a detailed discussion of the structure and control method. The preliminary experiment proved that the tactors can provide a precise tactile feedback to user's finger pad.

Section 3 describes the detection methods of object in virtual interaction. We use the combination of collision detection and ray detection to explore the surface characteristics of virtual objects. In order to feedback the virtual contact force, we use virtual springs to simulate virtual contact forces in interaction. Through an experiment by squeezing a user's finger pad, we determined a quadratic curve approximation of the relationship between extrusion force and finger pad deformation. By converting the virtual spring-deformation of the virtual finger pad to this relationship on user's finger pad, the virtual contact force can be reproduced at user's finger pad.

Section 4 describes the design of tactile feedback device using flexible tendon-driven transmission. The whole system is designed with compact structure, high portability and large amplitude compare with the existing device. The 4×4 tactor-array leads to high performance on surface reproduction. We described the texture detection method of virtual objects, and gave the solution of surface penetration in virtual interaction. By establishing and analyzing the elastic model of the system, the theoretical output error of the system is eliminated by increasing the input of the system. By comparing the similar devices, our device achieves a good combination of amplitude, portability and pin-force which reflect the shape retention ability.

Section 5 describes the experiments of hydraulic transmission tactile feedback device. We carried out a shape feedback and shape combine with contact force reproduction interactive experiments to verify the feasibility and performance of the device within Unity3D. Results showed that this device was capable of displaying the surfaces of virtual object and reproducing the contact forces to a user's finger pad. The maximum error of the tactor-array was about 0.432 mm and mainly occasioned at the beginning of tactor extending.

Section 6 describes the experiments of flexible tendon-driven transmission tactile feedback device. We evaluated the performance and the application of the flexible tendon-driven transmission tactile feedback device through a virtual touch experiment and a simulation experiment for vehicle safety cues. The virtual touch experimental results indicated it gave a clear enhancement in virtual touch and can provided high-fidelity 3D tactile feedback to the finger for use in virtual environment. The vehicle safety cues experiment provides further support for the feasibility of the concept that using tactile cues in vehicle driving.

Section 7 describes the discussions, conclusions and the future works of this study.

論文審査結果の要旨

本論文は、ハプティックデバイス（力覚提示装置）の一つである指先への触覚提示装置に関するものである。本論文では大きく2種類の触覚提示装置を提案している。一つは水圧シリンダを用いるものであり、もう一つはスプリングとサーボアクチュエータを組み合わせたもの（腱駆動型）である。前者は、空圧や油圧を用いた方法と比べ高性能であり、後者は高精度で物体形状の感触を提示するのに適したものである。加えて、論文では、ハプティックデバイスを自動車の運転時における障害物提示に利用するアプリケーションに関しても提案している。

本論文は7章からなる。第1章は、序論であり、背景、目的、枠組みが示されている。まず触覚フィードバック装置の従来研究と研究動向を示して、これからの技術の方向性を分析した結果を示している。

第2章は、水圧ピストンを用いた触覚提示装置について説明している。3×3のタクトアレイ（触覚器）モジュールと駆動ユニットを分離するために水圧シリンダによる伝達システムの設計とそれを実現する上での問題点を分析してデバイスの携帯性が高められている。空圧や油圧を用いた方法と比べ、反応が良いことが示されており、従来の方法より正確な提示手段を提案した点が評価できる。

第3章は、バーチャルインタラクション（仮想空間内において指で触れた物体の触覚を実際にフィードバックさせること）における物体の検出方法について説明している。衝突検出とレイトラッキング（光線追跡）の組み合わせを使用して、仮想的な物体の表面形状を調べるという方法を利用する。加えて、仮想触覚をフィードバックするために、仮想スプリングを使用して仮想触覚をシミュレートする。事前実験で押出し力と指パッドの変形の関係を表す近似2次曲線を決定し、仮想指パッドの仮想スプリング変形をユーザーの指パッド上の2次曲線で変換することにより、仮想接触力をユーザーの指パッドで再現できることが示されている。これらは、提案した触覚提示装置の実用価値を高めるアイデアを提案した点が評価できる。

第4章は、スプリングとサーボアクチュエータを組み合わせた腱駆動型触覚フィードバックデバイスの設計について説明している。タクトとサーボアクチュエータはワイヤーでつなげ、柔軟な腱のような駆動デバイスを使用した触覚フィードバックである。システム全体は、既存のデバイスと比較して、コンパクトな構造、高い携帯性、および大きな振幅で設計されている。システムの弾性モデルを確立し、システムの入力を適切に変換させることにより、理論上の出力誤差を排除している。以上により、従来の方法より大幅に精度が改善され、ユーザーが物体の形状を容易かつ正確に認識できるようになり、実用的なレベルに達した点は特に高く評価できる。

第5章は、水圧シリンダの触覚フィードバックデバイスの実験について説明している。ゲーム開発のデファクトスタンダードな開発環境である Unity3D において、デバイスの有用性を検証するために、形状フィードバックと形状接触の再現をインタラクティブに行う実験とを組み合わせ実行した結果が示されている。これにより、提案したデバイスが仮想物体の表面形状の触感を再現できることを示している。タクターアレイの最大誤差は約 0.4 mm と小さく、主にタクターの進展開始時に発生することを実験を通して示している。これらは、ゲーム等実際に利用されているアプリにデバイスを利用するアイデアを提唱した点が評価できる。

第6章では、柔軟な腱駆動型触覚フィードバックデバイスの実験について説明している。自動車の運転時における障害物提示のシミュレーション実験を通じて、柔軟な腱駆動型触覚フィードバックデバイスの有用性を評価した。バーチャルタッチの実験結果は、バーチャルタッチが明確に提示され、バーチャル環境で使用するために高精度の 3D 触覚フィードバックを指に提供できることを示した。自動車の運転時における障害物提示の実験では、自動車を運転する際に障害物を触覚で示すという方法を提案し、これが実現可能であることをシミュレーションを通して示した。これらは、ゲームや VR 等の娯楽だけでなく、実用的なアプリケーションへのデバイス利用手段を提案し、実用化に寄与するところが大きい点が高く評価できる。

第7章では、この研究における実験結果の議論、研究全体の結論、および今後の研究展開について説明している。

これらを通して本論文は、新たなハプティックデバイスの提案、より実用性を高めるための改良手法の提案、デバイスを利用した有用なアプリケーションの提案、およびこれらの定量的な検証を行い有用性を示している。これらの業績は、VR 工学分野、知能情報分野およびその実用分野の発展に寄与する。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名

Zhen Zhang , Xin Lu, Yoshihiro Hagihara and Adiljan Yimit , Development of a high-performance tactile feedback display for three-dimensional shape rendering, International Journal of Advanced Robotic Systems, (To be published online DOI: 10.1177/1729881419863187)