



非接地二指把持型力覚提示装置による大型 VR 物体形状知覚

Shape Perception of a Large-Scale Virtual Object Using an Ungrounded Two-Finger Grasping Haptic Interface

佐々木洋人¹⁾, 矢野博明²⁾
Hiroto SASAKI and Hiroaki YANO

- 1) 筑波大学 知能機能システム学位プログラム (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, h-sasaki@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)
2) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 本研究では, 非接地型の道具媒介型力覚提示装置による大型 VR 物体の形状提示手法を提案する. 装置は 3 自由度のハンドヘルド型力覚提示装置と光学式位置姿勢計測システムから成る. ユーザは効果器を親指と人差し指でつまみ, 手全体を VR 物体の表面に沿って動かすことで物体に触れたときの反力が提示される. これによりユーザはそこに物体面が存在するように認識する. 3 次元物体形状提示実験を行い, 提案手法の有効性を検証した.

キーワード: 力覚提示装置, 非接地, 物体形状

1. はじめに

VR 物体の形状や大きさ, 硬さなどをユーザに認識させる手法の一つとして, 人間が持つ体性感覚に対して触覚フィードバックを与えるという力覚提示手法が考えられる. これまでも, 力覚提示を行う装置の開発は多く行われており, 様々な実装方法が提案されてきた. 力覚提示装置は, 装置の支持部位の地面との接地の有無によって「接地型」と「非接地型」に分類できる. 接地型に代表される装置として PHANTOM[1] や HapticMaster[2] が挙げられる. 接地型の装置の利点として, 地面が力の支点となることによりバーチャルな物体に触れたときの反力を高精度にユーザにフィードバックすることが可能であることが挙げられる. これに対して, 非接地型の装置は, VR 物体との接触時に発生する反力をユーザに提示する際に, 装置の支持面に対して反作用力が発生する. このような事象は実空間で起こる触動作では発生しないため, 非接地型の力覚提示装置を用いた VR 物体との触動作においてユーザが得る力覚情報は, 実空間でユーザが得る力覚情報と異なるという課題が発生する.

大規模な空間での物体提示には非接地型の装置が適する一方で, 前述した理由から反力提示が困難である. しかし, 実空間において人間が大型の物体に触れて, その形状を確かめる際の動作を考えた場合, 手全体で表面を軽くなぞるなど, 指先のみでなく手全体を一体として動かすことが観察される. 一方で, 手の知覚機能のうち, 指先が最も鋭敏である. [3]

これらの事実から, 指先の可動範囲を制限し, 腕や手全体を一体として物体形状を確かめる動作に合わせて VR 物体に触れたときの反力を指先に提示することで, 大型 VR 物体の形状提示が可能になるという仮説を立てた.

この仮説を実証するために, 本研究では手のひらを支持部位とし, 人差し指と親指で効果器を把持する形の非接地二指把持型力覚提示装置のプロトタイプシステムを設計し, 評価実験によって提案手法の有効性を検証した.

2. 提案手法

本研究は, 手全体を一体として動かしながら, 指先に力覚をフィードバックする非接地型力覚提示装置で大型 3 次元物体形状を提示することを目的とする. そのため, 手のひらからの指先の可動域を制限できること, 可動範囲が広いこと, 小型軽量であること, さらに 3 次元で提示できることが装置の開発要件となる. 可動範囲を広くするには, 非接地型装置の採用が現実的である. 非接地型ハプティック・インタフェースとして, 外骨格型, 対象指向型, 道具媒介型が考えられるが, 外骨格型は, 提示できる力の向きが限られている, 対象指向型は力の大きさの制御ができないという理由から本システムに向かない. そこで本研究では, 図 1 のような手のひらを支持部位とし, 指先で効果器を把持する道具媒介型ハンドヘルド装置を採用した. 手のひらを支持部位とする構成によって, 把持部位である効果器の, 支持点から見た可動範囲が小さくなるため, 従来の力覚提示装置で用いられるものより出力が小さいモータでも物体形状の知覚の際に発生させる反力を提示することが可能となり, 装置の小型軽量化も実現できる.

3. システム構成

本研究で開発したプロトタイプシステムの全景を図 2 に, システムの全体構成を図 3 に示す. 本システムは, ユーザに VR 物体に触れた際の反力を提示する非接地二指把持型力覚提示装置, 効果器の位置・姿勢の計測を行うための光学式

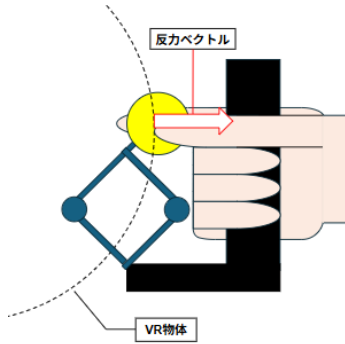


図 1: 提案したシステム

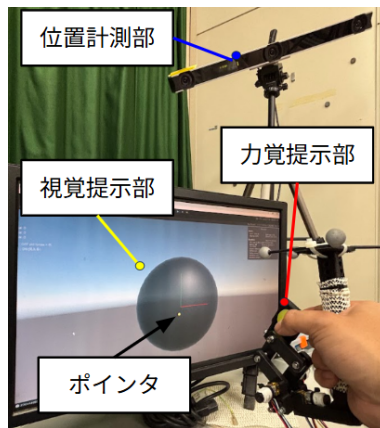


図 2: システムの全景

位置姿勢計測システムの Optitrack, 反力計算と視覚提示処理を行う PC, 本研究室で開発されたマイクロコントローラである Device Art Tool Kit[4], および視覚提示用ディスプレイから構成される。

ディスプレイには Unity を用いて視覚提示を行った。非接地二指把持型力覚提示装置を手で持って動かすと、液晶ディスプレイに表示されているポインタが効果器位置と連動して動作する。このポインタが VR 物体に触れたとき、反力は指先で把持している効果器を介して提示される。

図 4 に非接地二指把持型力覚提示装置の構成を示す。ユーザは手のひらでグリップを支持し、人差し指と親指で直径 25mm の球状効果器を把持する。本装置は二自由度の平行四節リンクを有し、3 つの DC モータ (Walfront 社, GBMQ-GM12BY20) のトルク制御によって効果器に任意の 3 次元力ベクトルを提示する。最大出力は指先位置で約 5N, 本装置の重量は 273g である。また、本システムの動作周波数は約 60Hz である。

4. 動作原理

効果器位置で任意の 3 次元力ベクトルを出力するための計算式を以下に示す。図 5 のように、各モータの回転角を $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, パンタグラフの各リンク長を L , 効果器位置のオフセットを a , パンタグラフのオフセットを b とおく。効果

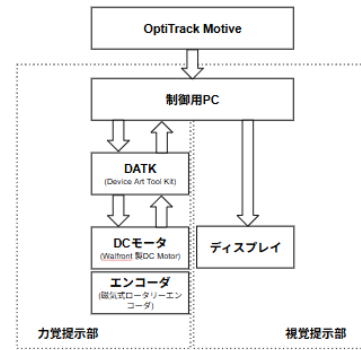


図 3: システムの構成図

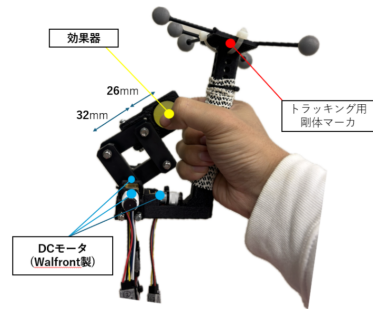


図 4: 非接地二指把持型力覚提示装置

器位置を $[x, y, z]^T$ とすると

$$\begin{cases} x = L \cos \theta_1 + L \cos(\theta_1 + \theta_2) + a \cos \theta_1 \\ y = L \sin \theta_1 + L \sin(\theta_1 + \theta_2) + a \sin \theta_1 + b \\ z = L \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

ヤコビアン行列を J , モータトルクを τ , 指先位置での力ベクトルを F とすると

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\tau = J^T F \quad (3)$$

として、各モータが出力すべきモータトルクが導出される。

また、力覚レンダリング手法として、ペナルティ法を用いた。

5. システムの評価実験

5.1 実験手法

本システムの有効性を検証するため、球状または壁面を模した VR 物体の表面のなぞりと球殻の内側をなぞるような球状 VR 物体の内側なぞりの評価実験を、手指の触覚の知覚機能に異常が無い健康な 20 代前半の男性 4 名の実験参加者を対象として実施させた。実験では、図 2 の視覚提示部に示すディスプレイ上に半透明の球と立方体の VR 物体を表示させた。半透明であることでポインタの位置をユーザが常に把握可能な状態となる。球状 VR 物体の表面と内

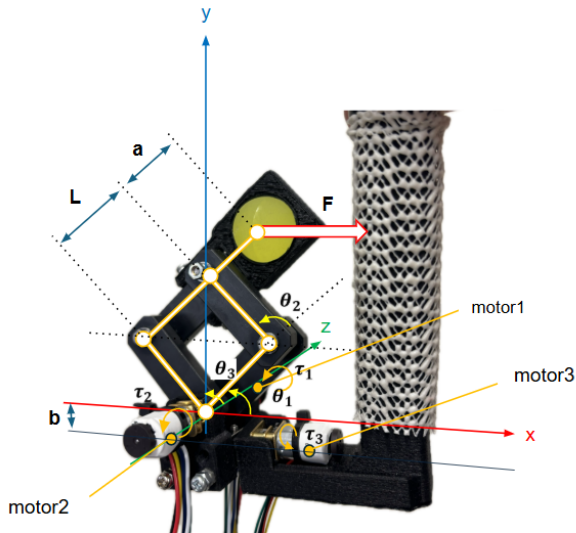


図 5: 装置の機構とパラメータ

側、立方体の1つの面を壁面として壁面 VR 物体の表面を、力覚提示あり・なしの条件でなぞらせ、各条件の試行の終了時に実験参加者の主観評価を以下の3項目のアンケートを5段階評価（1：全くそう思わない～3：どちらとも言えない～5：大いに思う）で回答させた。

項目1 触動作において物体形状をうまくなぞることができた。

— 以下の項目は力覚提示ありの条件のみ回答 —

項目2 実物体の触動作と比較して、装置の反力の大きさに違和感があった。

項目3 実物体の触動作と比較して、装置の反力の向きに違和感があった。

実験手順は球状 VR 物体の表面なぞり動作、壁面 VR 物体の表面なぞり動作、球状物体の内側なぞり動作の順に実施した。なぞり方は、壁面横方向、球状物体では緯線方向に3周のなぞり動作をさせ、その後に壁面縦方向、球状物体では経線方向のなぞり動作を3周させるように指定し、それぞれの条件下で力覚提示なしの場合の後にありの場合の順で実験を行った。実験参加者には、手指への疲労を考慮して各試行の間に1分間の休憩をとらせ、力覚提示装置の使い方に慣れてもらうため、実験の前に30秒間力覚提示装置を自由に操作させる時間を設けた。

5.2 実験結果と考察

図6と図7に実験で得られた1人の実験参加者の球状 VR 物体内側かつ緯線方向なぞりの効果器位置の軌跡を示す。図6の力覚提示なしの効果器位置の軌跡は、提示している物体に対して膨らむような大きなずれがあるが滑らかな軌跡となっている。これに対して、図7の力覚提示ありの効果器位置の軌跡は、ずれがあるものの3周とも同じような軌跡を描いている。しかし、図6と比較して図7の四角形で囲った部分のような滑らかになぞらずにスパイク状の軌跡になっている部分が見られる。これは本システムの動作周波数が、物体形状を提示する力覚提示装置に必要な動作周

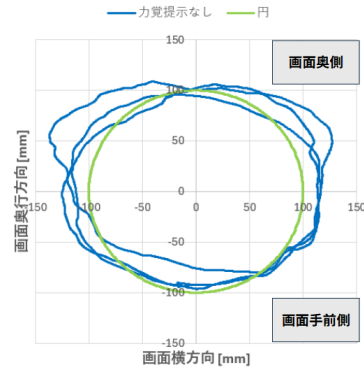


図 6: 力覚提示なしの軌跡

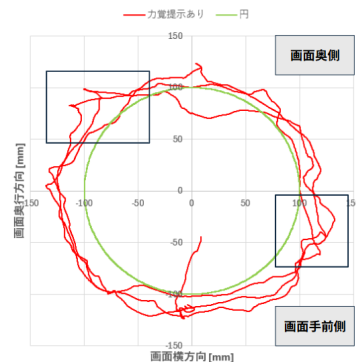


図 7: 力覚提示ありの軌跡

波数である 1000Hz[5] に達していないことが原因として考えられる。動作周波数の不足によって、実験参加者は力覚を知覚して軌道を修正するという動作を無意識に細かく繰り返したためスパイク状の軌跡となる部分が見られた。

項目1のアンケート結果を図8に、項目2のアンケート結果を図9に示す。図8から、球の表面なぞり、壁面のなぞり動作、球の内側なぞりのいずれの条件においてもアンケートの評価値の平均値が大きくなり、特に球の内側なぞり動作においてその傾向が顕著にみられた。手や腕の構造が球のような物体面、特に実験参加者から見て奥に凸となる円弧を描きやすいため、力むことなく効果器からの力覚を知覚できたためと考えられる。実験参加者からも、「壁面の物体をなぞっている時よりも球状の VR 物体をなぞっている時のほうが物体の形状を知覚しやすかった」というコメントが得られた。

図9は、本装置の設計が適切であったかどうかを判断する目的で実験参加者に回答させたアンケートである。項目2の「装置の反力の大きさに違和感があった」という評価値に関して、3つの条件すべてにおいて平均値が約3以上と高いため、本装置が指先に提示する反力の大きさは、実空間の物体をなぞる時と比較して大きく異なるということが示唆される。実験参加者からも「物体をなぞっているだけに急に大きな力が加わる時があった」というコメントが得られた。これは、動作周波数の不足に起因する急激な反力の大きさの変化があったためだと考えられる。実験参

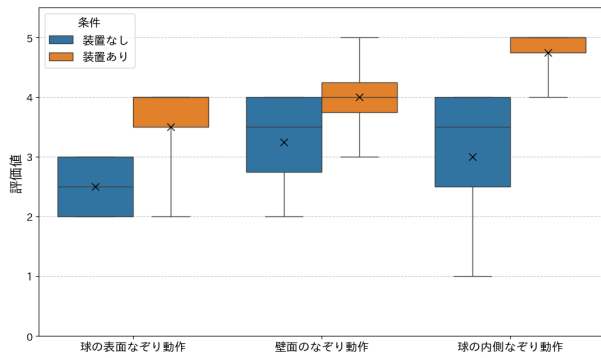


図 8: 項目 1 のアンケート結果

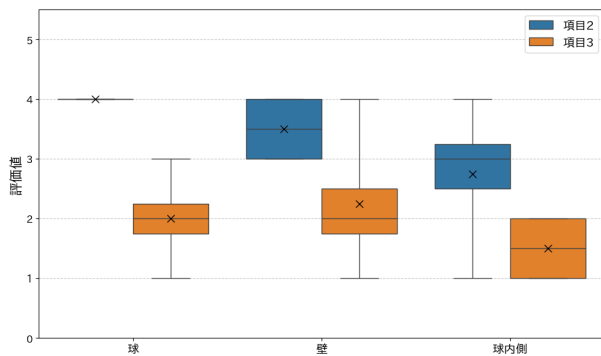


図 9: 項目 2, 3 のアンケート結果

加者のコメントで「把持している指が疲れた」というものがあつたため、提示する力の大きさについても検証する必要がある。項目 3 の「装置の反力の向きに違和感があつた」という評価値に関して、3つの条件すべてにおいて、平均値が約 2 以下であることから、装置が提示する反力の向きに関しては実空間での物体なぞり動作時に発生する反力との相違はないと考えられる。

6. まとめ

本研究では、接地型の力覚提示装置の動作範囲を超えるような大型の VR 物体の形状提示を行うことを目的として、非接地二指把持型力覚提示装置のプロトタイプシステムを設計、開発した。

評価実験の結果、実験参加者からのアンケートからは本システムで物体の形状知覚を行える可能性が示唆された。しかし、動作周波数が原因で実空間で物体をなぞる時のような滑らかな形状提示を実現できていないため、今後の課題としては、システム全体の動作周波数の改善が挙げられる。また、Large Space[6] のような大規模空間中での力覚提示を想定したシステムを開発したが、デスク上の小規模空間での検証にとどまっているため、大規模空間での本手法の有効性を今後明らかにする。

参考文献

- [1] T.H.Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects", in Proc. 3rd Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 295-300, 1994.
- [2] 浅野, 矢野, 岩田: フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発、日本 VR 学会第 1 回大会論文集、pp1113- 1120、2000
- [3] S. Weinstein: "Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality", In: D. R. Kenshalo (Ed.), *The skin senses*, C. C. Thomas, Springfield, IL, pp. 195-222 (1968).
- [4] 圓崎, 佐藤, 矢野, 岩田: デバイスアート・ツールキットの開発、日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 15 No.3, pp.417-426, 2010
- [5] Colgate, J. E., & Brown, J. M. (1994). Factors affecting the Z-width of a haptic display. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (Vol. 4, pp. 3205-3210).
- [6] 高島 光, 圓崎 祐貴, 矢野 博明, 岩田 洋夫, 「大規模没入ディスプレイ LargeSpace の開発」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No3, pp.493-502, 2016.