

安定性と忠実性を両立させる高解像度力覚レンダリングの開発

赤羽 克仁[†] 小池 康晴[†] 佐藤 誠[†]

本研究では、ビデオレート（60 Hz～）で実行する解析法ベースの剛体を扱う VR 世界において高解像度力覚レンダリング（10 kHz の力覚提示）を行うためのシステムを提案する。力覚の安定提示だけの実現であれば、VR 世界と力覚提示装置をバーチャルカップリングにより接続し、危険な共振が発生しない低いカップリング係数で接続すればいい。しかしながら、安定提示のための実際のカップリング係数は非常に低い値しかとれず、剛体と力覚ポイントの結合度が低くなり、操作の忠実性が損なわれてしまう。また、ビデオレートという低更新周波数を 10 kHz の力覚提示装置の高更新周波数にどのようにアップサンプリングをするかが問題となる。提案するシステムは、安定性と忠実性の両立を、2 段構成で約 160 倍のアップサンプリングを行うマルチレートシステムである。1 段目のバーチャルカップリングにより剛体操作の安定性を、2 段目の高解像度力覚補間レンダリングによりカップリングにより失われた提示面の忠実性を補償することを目指す。また、提案システムによって実際に安定性と忠実性がどのように両立されるのかを計算機シミュレーションにより検証する。そして、実際に 6 自由度の力覚提示装置を 10 kHz の更新周波数で制御し安定性と提示面の力覚クオリティ（忠実性）に関する評価実験を行うことで、その有効性を示す。

A Development of High Definition Haptic Rendering for Stability and Fidelity

KATSUHITO AKAHANE,[†] YASU HARU KOIKE[†] and MAKOTO SATO[†]

In this paper, we propose and implement a 10 kHz high definition haptic rendering that can display on general video-rate (60 Hz) VR applications. Our proposal requires both fidelity and stability in the multi-rate system, which the frequency ratio approximates at 160 times. For satisfying two criteria, there are some problems to be resolved. In the view of getting only stability, we can use a virtual coupling method to link a haptic display and a virtual object. However, due to low its coupling impedance, this method isn't good for realization of fidelity and quality of manipulation. Therefore, we have developed a multi-rate system with two levels up-sampling for both fidelity and stability of haptic rendering. The first level up-sampling achieves stability with the virtual coupling, and the second level achieves fidelity with 10 kHz haptic rendering to compensate the haptic quality lost from the coupling process. We confirmed that our proposed system could achieve the stability and fidelity of haptic rendering through a computer simulation and a 6DOF haptic interface (SPIDAR-G) with a rigid object simulation engine.

1. はじめに

近年、計算機処理能力の向上により、複雑な 3 次元 VR 空間を構築できるようになってきた。特に、物理シミュレーションをともなった VR 世界の構築が可能になり、物理世界に力覚提示を加えたシステムも提案されている。従来から力覚の安定提示には力覚提示装置を高速で制御することが必要であり、特に 1 kHz で制御することがいわれてきた^{7),12),13)}。しかしながら、1 kHz での制御では力覚の提示能力が乏しく、また、

一般的な PC 環境では OS（オペレーティングシステム）にリアルタイム性がないことなどにより 1 kHz の更新周波数を安定に維持することが難しいことから、ユーザの要求する力覚提示を実現するのが困難であった。そこで、我々はホストとなる PC の負荷に依存せず 10 kHz での力覚提示を 3 自由度力覚提示装置で実現した²⁰⁾。これにより、力覚提示能力（Z-width）が従来の約 10 倍となり、非常に硬い提示面が安定に提示可能となった。しかしながら、デバイス単体での性能評価だけでは実際に力覚提示装置を一般的にビデオレート（60 Hz～）で開発された VR アプリケーショ

[†] 東京工業大学精密工学研究所

P&I Laboratory, Tokyo Institute of Technology

安定提示可能なインピーダンス領域

ンで用いる場合、その力覚提示性能を十分に活かさないことが明らかとなった。

その理由として、ビデオレートで実行可能な解析法ベース^{4),14),15)}の剛体シミュレータによるVR世界では、制約条件により剛体の接触が計算されるため剛体どうしが侵入しようといったペナルティ法^{16),17),25)}に見られる欠点はなく、視覚提示から見た場合の忠実性は高いといえる。しかしながら、このようなVR世界で力覚提示を行うことを考える場合、力覚提示装置にインピーダンス型の装置を用いると、VR世界と入出力が一致しないために、これらを直接接続することができない。そこで、パーチャルカップリング^{2),8),19)}を用いて安定に接続することが提案されている。カップリング係数を大きくすることで、剛体と力覚ポイントの結合度が大きくなり操作の忠実性を高くすることが可能であるが、実際にはVR世界はビデオレートという低更新周波数で実行されているため、安定に接続可能なカップリング係数は大きくできず、力覚クオリティが乏しい。この例からも分かるように、一般に力覚提示の安定性と忠実性(力覚クオリティ)はトレードオフの関係になる。しかしながら、忠実性と安定性を天秤にかけ、剛体接触時のような忠実性を重視したいときには忠実性を、そのほかの安定性が要求される剛体操作では安定性を重視し、双方の良い部分を組み合わせることで、これら2つの要素を高い次元で両立させることができれば、従来では提示困難であったビデオレートのVR世界に対して、高解像度力覚レンダリングが実現できると考えられる。

2. 本研究の目標と提案

剛体操作で重要となる要素の1つに、剛体の接触感がある。特に、剛体どうしが衝突するとき、硬いものと硬いものとがぶつかった感覚を力覚提示装置で提示する必要があると考える。よって、剛体の接触感である提示面の硬さを忠実性の指標と考えることにする。本研究においての要求項目を、視覚提示側と力覚提示側の双方から見た場合に分けて以下に示す。

視覚提示側から見た要求項目

- 剛体どうしが侵入することを許さない(視覚的忠実性)
- VR世界(剛体シミュレータ)の更新周波数はビデオレート(60Hz~)
- VR世界の安定実行

力覚提示側から見た要求項目

- 接触時の剛体面の硬さ(力覚的忠実性)
- 力覚提示の更新周波数は10kHzの高解像度力覚

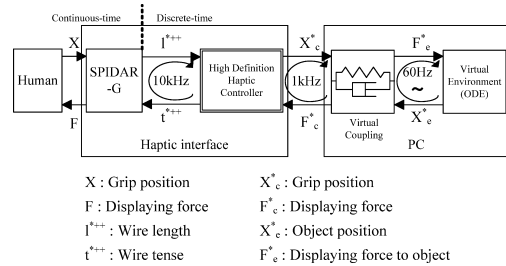


図1 提案手法のシステム構成
Fig. 1 System configuration.

レンダリング²⁰⁾

● 剛体の安定操作

まず、視覚提示側から見た要求項目について説明する。一般に視覚の影響は人間の認知に大きな影響を及ぼすことから、剛体操作時に剛体どうしが侵入することによる操作の忠実性の減少を避けなければならない。また、一般的なVRアプリケーションの更新周波数はビデオレートを対象に開発されているため、これらのアプリケーションでも力覚提示を可能にするを目指す。次に、力覚提示側から見た場合だが、接触時の剛体面の硬さは、我々が開発した10kHzの高解像度力覚レンダリング²⁰⁾で実現した硬さの力覚提示を目指すこととする。また、操作の安定性は、力覚提示装置を利用するのは人間でありユーザに対して危険な装置の発振は避けなければならないので、必要である。

これらの要求を実現するための問題点の1つは、VR世界がビデオレート(60Hz~)という低更新周波数にもかかわらず、力覚提示には高解像度力覚レンダリング(10kHz)と同等の提示面の硬さ(忠実性)を目指すところである。すべての更新周波数を10kHzで実現できれば理想だが、現実的に剛体を扱うVR世界を10kHzで実現するのは一般的なPC環境ではハードウェアの性能などから困難である。そこで、これらの要求を実現する約160倍のアップサンプリングを行う提案システムの構成を図1に示す。

一般に、マルチレートのシステム概念自体は力覚提示の研究においてもすでに提案されている^{1),5),6),10),20)}。しかしながら、これら従来の研究では約1kHzまでのマルチレートを対象としたシステム構成であり、剛体面の忠実性を要求する場合、1kHzの力覚提示では十分とはいえない。本研究では、力覚提示時の更新周波数が10kHzという高解像度力覚レンダリングを用いるため、従来の1kHzの力覚レンダリングでは提示できないZ-widthを用いることで、剛体操作時の提示面のクオリティが飛躍的に向上すると考えられる。また、剛体シミュレータをとまなうVR

世界に限らず、一般的なビデオレートで動作する従来の VR アプリケーションでも高解像度の力覚提示が可能となる。提案手法の重要な点は、VR 世界と力覚提示装置の更新周波数比（約 160 倍）のアップサンプリングを行うマルチレートを 2 段階構成で用いることにより、1 段階目のバーチャルカップリングで操作の安定性を 2 段階目の高解像度力覚レンダリングで提示面のクオリティの両立が実現できるところである。

本論文では、まず、提案システムの構成要素について説明し、提案システムの計算機シミュレーション結果と評価実験により、提案手法の有効性、すなわち剛体操作の安定性と忠実性の両立が実現できることを示す。

3. 力覚提示装置

力覚提示装置は、大きく分けてインピーダンス型とアドミッタンス型に分類される。本研究では、インピーダンス型の力覚提示装置を対象とする。インピーダンス型の力覚提示装置の力覚の安定提示に関する研究はさかんになされているが、Colgate ら⁷⁾は、受動定理を用いて安定提示のための条件式 (1) を求めている。一般に、力覚レンダリング（提示力の計算）には、力覚ポインタと提示面の間に仮想バネとダンパを用いたペナルティ法により計算される。このとき、提示面のインピーダンス、力覚提示装置の機械的インピーダンスと更新周期の間に

$$b > \frac{KT}{2} + |B| \quad (1)$$

b : デバイス固有のダンパ定数

T : 更新周期

K : 提示面バネ定数

B : 提示面ダンパ定数

の関係があることが知られている^{7),13)}。これによれば、提示面のインピーダンスを高くしたければ更新周期を短くすること、すなわち更新周波数を高速にする必要がある。また、デバイス固有のダンパ定数を大きくすることでも提示面のインピーダンスを高くできるが、デバイス固有のダンパ定数を上げることは、自然な操作性（透明性）を損なうことになってしまう。よって、提示面の安定性と剛体面のクオリティ（忠実性）をデバイスレベルで両立するためにはデバイスの更新周波数の高速化が必要であることが分かる。

4. バーチャルカップリング

力覚提示装置と VR 世界の接続の問題を考える。力覚提示装置にインピーダンス型、剛体シミュレータに

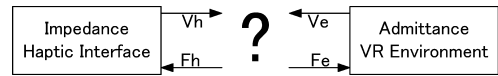


図 2 力覚提示装置 vs. 解析法ベースの VR 世界
Fig. 2 Haptic interface vs. virtual environment.

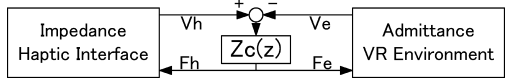


図 3 バーチャルカップリング
Fig. 3 Virtual coupling.

解析法ベースを選択した場合のそれぞれのシステムの入出力に注目する（図 2）。まず、インピーダンス型のデバイスでは、位置・姿勢情報（ V_h ）をデバイスから取得し、提示力（ F_h ）をデバイスに出力する。一方、解析法では、シミュレータは対象物体にかかる力（ F_e ）を入力として受け取り、その物体の位置・姿勢（ V_e ）を出力する。そのため、この 2 つのシステムを直接接続することができない。このような入出力の異なるシステムを安定性を考慮して接続する方法として、バーチャルカップリングがある^{2),8),19)}。

本研究で用いるバーチャルカップリングでは、図 3 のような形をとり、両者を仮想的なバネとダンパで接続する。そして、VR 世界の更新周波数（60 Hz ~）をバーチャルカップリングにより、PC と高解像度ハプティックコントローラの通信速度である 1 kHz にアップサンプリングする。これにより、後述する高解像度力覚レンダリングに送られる情報の更新周波数が 1 kHz となり、我々が文献 20) で示したような高い Z-width の効果を同様に得られると考えられる。また、アップサンプリングを行うため、VR 世界に入力される対象物体への力情報 F_e は、力覚ポインタへの提示力 F_h の時間的平均値 \bar{F}_h を用いることにする（式 (3)）。

$$F_h = Z_c(V_h - V_e) \quad (2)$$

$$F_e = \bar{F}_h \quad (3)$$

このようなバーチャルカップリングの場合、VR 世界と力覚提示装置の結合の度合いはそのカップリングインピーダンス Z_c に依存する。すなわち、忠実性を増加させるためには VR 世界と力覚提示装置の結合度であるカップリング係数を大きくする必要がある。しかしながら、VR 世界はビデオレート（60 Hz ~）という低サンプリング周波数で動作しているため、カップリング係数を高く設定すると仮想バネやダンパの受動性が保たれず⁹⁾、仮想物体と力覚提示装置が発振する可能性がある。よって、実際に利用する場合、カップリング係数は低く設定せざるをえなくなり、そのため VR 世界と力覚提示装置の結合度が低くなり、操作

の忠実性が損なわれてしまう。

本研究では、1 段目のバーチャルカップリングによって失われた忠実性を取り戻すために、2 段目で面情報と周波数比を用いた高解像度力覚レンダリングを用いる。

5. 高解像度力覚レンダリング

力覚補間には、文献 1), 22), 24), 26) などの研究があるが、本研究では我々が提案した文献 20) をベースにした方法を用いる。まず、バーチャルカップリングによって生成された提示力 $F_h (= F_0)$ から提示面 w_0 を推定する。 F_0 をカップリング係数 Z_c のバネ成分 Z_{ck} で除算することで提示面 w_0 を推定する。これにより、力覚ポインタの位置 P_0 で、提示力 F_0 を提示する面 w_0 を考えることができる。また、面情報を力情報として抽象化でき、計算量が少ない力覚補間が可能となる。特に 6 自由度の力覚レンダリングにおいては、力覚ポインタに接続される物体の形状情報などが必要になるが、これらを力情報に抽象化して力の補間として力覚レンダリングを行うため、物体の形状情報などの複雑な情報が必要ないという特徴がある。また、補間中は次に面情報が更新されるまでは、提示面はつねに一定であると仮定して補間することとする。

5.1 6 自由度 10 kHz 力覚補間レンダリング

以下では 6 自由度で 10 kHz の更新周波数を実現する力覚補間レンダリングについて述べる。並進 3 自由度についての力覚補間レンダリングの概要図を図 4 に示す。力覚ポインタの位置 P_0 で、提示力 F_0 を提示する面 w_0 を考える。補間中に力覚ポインタの位置が p に変位すると提示面方向の変位 x から、提示力の変化量 ΔF を求め、提示力を更新することで力覚補間を行う。並進 3 自由度での本補間方法の評価実験の結果²⁰⁾ では、10 kHz という高速な更新周波数のため比較的計算量の低い演算で高い性能向上が得られた。そこで、回転 3 自由度についても、並進 3 自由度とのアナログから位置 p を姿勢 θ に力 F をトルク T に

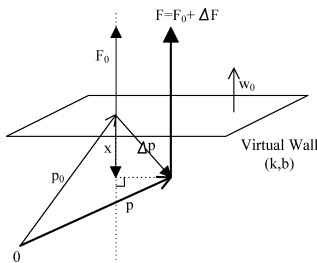


図 4 力覚補間レンダリング (並進方向)
Fig. 4 Interpolating haptic rendering.

変換した式 (10) ~ 式 (14) の補間を行う。そして、約 160 倍のアップサンプリングのため、更新周波数比で提示力を逡倍する (式 (9), 式 (14))。条件式 (1) によれば、制御周波数に比例して提示面のバネ定数を高く設定できる。バーチャルカップリングで設定されるカップリング係数は、60 Hz のビデオレート (f_{SIM}) の VR 世界で剛体を安定に操作するために設定されているため非常に低い値であるが、力覚提示側は 10 kHz という更新周波数 (f_{IHR}) でレンダリングされているので、より高いカップリング係数での提示が可能となる。本研究では剛体操作を対象としているので、剛体面のインピーダンスは可能な限り高くすることが重要である。そこで、式 (9), 式 (14) により、更新周波数比 (r_f) で提示力を逡倍することで、アップサンプリングによる力覚情報の補間を行う。

また、文献 20) では、補間する力は提示面を仮定していたが、本研究ではカップリングされた物体にかかる力を補間することになる。よって、カップリングされた物体がそのほかの物体に接触していないときにも補間機能を適用してしまうと、物体の慣性などの力まで、提示面として補間されるため正しく力覚提示できない。そこで、力覚補間は面を提示するときのみ適用することとする。

並進 3 自由度に関する力覚補間レンダリング

$$\Delta p = p - p_0 \tag{4}$$

$$x = \frac{w_0 \cdot \Delta p}{w_0 \cdot w_0} w_0 \tag{5}$$

$$\Delta F = -kx - b\dot{x} \tag{6}$$

$$F = F_0 + \Delta F \tag{7}$$

$$r_f = \frac{f_{IHR}}{f_{SIM}} \tag{8}$$

$$F_{IHR} = r_f F \tag{9}$$

回転 3 自由度に関する力覚補間レンダリング

$$\Delta \theta = \theta - \theta_0 \tag{10}$$

$$x_\theta = \frac{w_{T0} \cdot \Delta \theta}{w_{T0} \cdot w_{T0}} w_{T0} \tag{11}$$

$$\Delta T = -k_T x_\theta - b_T \dot{x}_\theta \tag{12}$$

$$T = T_0 + \Delta T \tag{13}$$

$$T_{IHR} = r_f T \tag{14}$$

5.2 高解像度ハプティックコントローラ

我々は、力覚提示装置を PC の負荷に依存せず安定にかつ高速に制御するために高解像度ハプティックコントローラを開発した²⁰⁾ (図 5)。このコントローラに搭載される組み込みプロセッサの Renesas Technol-

補間情報として、力覚提示の対象となる仮想物体が、そのほかの仮想物体に接触しているかどうかを示すフラグを追加する。

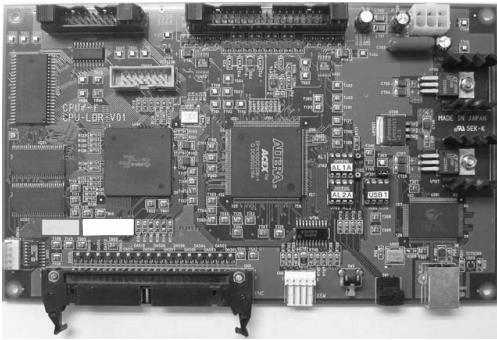


図 5 高解像度ハプティックコントローラ
Fig. 5 High definition haptic controller.

ogy 社製 SH4 (SH7750@200 MHz) を用い、デバイス固有の処理を高速に演算し、プロセッサの高精度タイマを用いて精度の高い更新周波数を実現した。

本研究では、並進 3 自由度・回転 3 自由度の計 6 自由度の位置・姿勢計算および力覚計算をこのプロセッサで処理している。開発環境には、HEW3 (Renesas Technology) を使用し、C/C++コンパイラ・アセンブラに SuperH RISC engine tool-chain 7.1.3.0 を用いた。また、10 kHz という高更新周波数を実現するため、割込みのオーバーヘッドを避けるため、リアルタイム OS は使用せず、速度が必要な部分はアセンブラによって記述している。

6. システムの全体構成

提案システムをまとめる。VR 世界は、解析法ベースの剛体シミュレータでビデオレートで実行可能とする。力覚提示装置は、インピーダンス型の 6 自由度のデバイスを 10 kHz で実行する。よって、システムは、2 段で約 160 倍のアップサンプリングを行うマルチレートシステム (図 6) である。VR 世界側から数えて 1 段目のアップサンプリングは、バーチャルカップリングによって VR 世界の更新周波数が PC と高解像度ハプティックコントローラとの通信速度である 1 kHz にアップサンプリングする。このときのカップリング係数は、安定性の確保のため低い値に設定し、剛体操作に安定性を持たせる。2 段目のアップサンプリングは、高解像度力覚レンダリングによって、コントローラに送られてきた提示面情報と 10 kHz で更新される力覚ポインタの位置・姿勢に基づき提示力を計算する。このときの提示面のインピーダンスを比較的高い値に設定することで、剛体の接触時の接触感を現実の剛体操作での接触感にできるだけ近いものにし、剛体操作の接触感の忠実性を実現する。

このような、1 段目のカップリングにより剛体操作

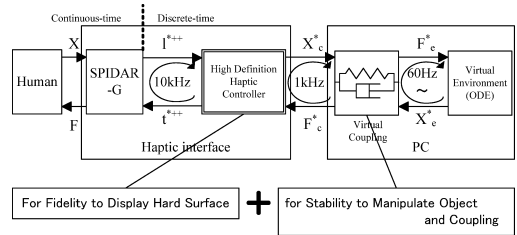


図 6 システム構成
Fig. 6 System configuration.

の安定性を、2 段目の力覚補間によって接触時の提示面の忠実性を実現する構成をとり、双方を合わせることで安定性と忠実性の両立を実現する構成となる。

7. 提案手法のシミュレーション

提案手法による安定性と忠実性の両立について検証するため、計算機シミュレーションを行った。シミュレーションを行ったシステムは提案手法の図 6 と仮に VR 世界も 10 kHz で実行できたとする図 7 である。力覚ポインタを握る人間をバネ・ダンパとし、片方を力覚ポインタに接続し、もう片方は接地した。人間のインピーダンスは、複雑に変化しその状況をシミュレーションすることは困難であるので、一定値とした。仮想物体の位置を図 8 (1) に従って変位させたときの力覚ポインタにかかる提示力をシミュレートした。図 8 (1) の変位は、仮想物体がそのほかの仮想物体に接触したときにステップ上に移動した状況を想定している。また、カップリング係数と力覚補間係数を変化させ (表 1) どのような挙動を示すか調べた。A から C は図 7 でのシミュレーションに用い、D から F は提案手法の図 6 でのシミュレーションに用いた。

7.1 シミュレーション結果

A ~ C, D ~ F のシミュレーション結果をそれぞれ図 8 (2), (3) に示す。また、比較のために力方向は 1 に正規化した。まず、図 8 (2) の結果より、カップリング係数を上げることで、剛体接触時の立下りが急になる (図 8 の a)。これは、実世界で物体をたたくとき、物体の硬さに応じて接触時の波形の立下りが急になること^{3),11)} に対応する。つまり、剛体のように非常に硬い物体として提示する場合、立下りが急になるような波形が提示面のクオリティを高める要因であることが分かる。また、接触後の定常状態 (図 8 の b) ではそれぞれ提示面の力の釣り合いの位置に収束する。

次にカップリング係数を低い一定値とし、力覚補間 (IHR) を適用した D ~ F の結果の図 8 (3) を見ると、接触時の立下りの波形が、あたかもカップリング係数を力覚補間の係数に設定したかのような (図 8 の a)

振舞いをする事が分かる．そして，定常状態では，本来のカップリング係数の収束値（図 8 の b）に収束する．つまり，接触時は非常に硬く剛体と力覚ポイントが結合されるため忠実性が高くなり，そのほかの操

作では低いカップリング係数により安定性が保たれる構成になっている事が分かる．

また，力覚補間の係数を大きくすることにより，接触時に非常に細かな波形が生成されることが分かる．これは，カップリング係数を大きくした場合には発生しない波形であり，力覚補間による誤差が原因と考えられる．しかしこれは，非常に細かい波形であり，危険な発振を起こすほどの振動とはいえない．また，文献 3), 11), 28) などから，接触時にパルス的な信号を与えることや，微小振動を与えることで，より物体を硬く感じさせることから分かるように，提示面の硬さを感じさせる要因の 1 つになると考えられる．

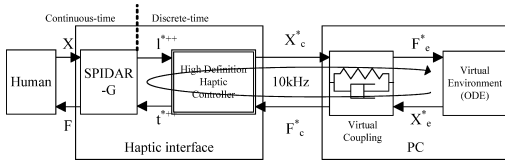


図 7 すべて 10 kHz で実行可能であったとした場合

Fig. 7 System configuration of 10kHz ideal simulation.

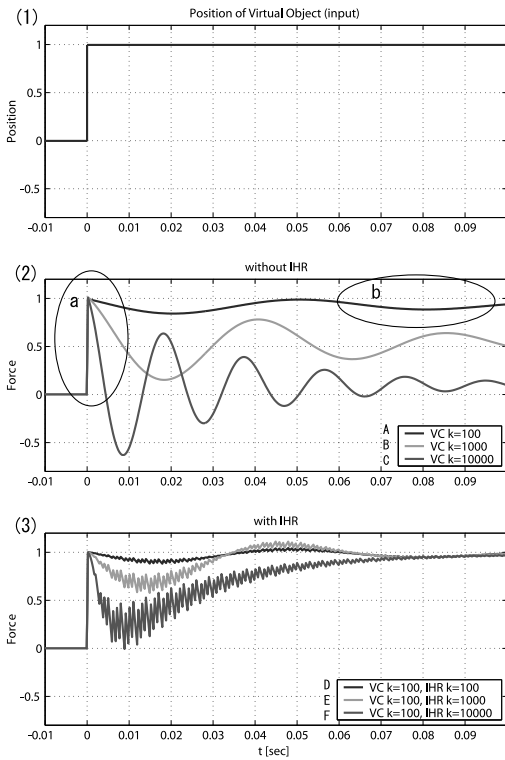


図 8 シミュレーション結果

Fig. 8 Simulation results.

表 1 シミュレーションで用いるカップリング係数と補間係数
Table 1 Coefficients between virtual coupling and interpolating haptic rendering for simulation.

	Virtual Coupling Kc	IHR K
A	100	—
B	1000	—
C	10000	—
D	100	100
E	100	1000
F	100	10000

A-C: without IHR

D-F: with IHR

8. 評価実験

提案手法による安定性と忠実性の両立について検証するため，評価実験を行った．VR 世界の剛体シミュレータには解析法の Open Dynamics Engine (ODE)¹⁵⁾ を用い，力覚提示装置には，並進・回転 6 自由度提示可能なワイヤ駆動型力覚提示装置^{18), 21), 23), 27)} SPIDAR-G/AHS10.0A (図 9) を用いた．装置の仕様を表 2 に示す．

8.1 剛体面の接触実験

剛体面の接触時において，安定性と忠実性が実際にどのように両立されるかを調べる．実験は，力覚ポイントを立方体の剛体にカップリングし，剛体を提示面に接触させ，そのときの力覚ポイントの位置と提示力を計測することで行った．VR 世界は ODE を約 60 Hz のビデオレートで実行し，計測は 10 kHz で行った．実験の様子を図 10 に示す．

8.1.1 実験 1

まず，バーチャルカップリングのみで接続し，提示面に関する力覚補間は適用せず，提案する力覚補間の周波数比 ($\times 60/60$, $\times 1000/60$, $\times 10000/60$) で提示力を通倍する部分を適用した場合を調べる．10 kHz での面の力覚補間を適用しないので，実際の更新周波数



図 9 SPIDAR-G/AHS10.0A

Fig. 9 SPIDAR-G/AHS10.0A.

以下の実験結果では，提示面方向の成分を示す．

表 2 SPIDAR-G/AHS10.0A の主な仕様

Table 2 Specification of SPIDAR-G/AHS10.0A.

Workspace	200 (W) × 150 (H) × 200 (D) [mm]
Input	24 bits encoder counter × 8ch
Output (D/A)	0-100% (12 bits) × 8ch
Encoder resolution	500 [pulse/turn] × 4 [count/turn]
Pulley radius	5.0 [mm]
Grip radius	24.0 [mm]
Wire tension	880-1230 [N/dtx]
Motor	Maxon RE-max 24
Freq. (PC-HDHC)	1000 [Hz] (max: 3000 [Hz])
Freq. (HDHC-SPR)	10000 [Hz]

HDHC: High Definition Haptic Controller

SPR: SPIDAR-G

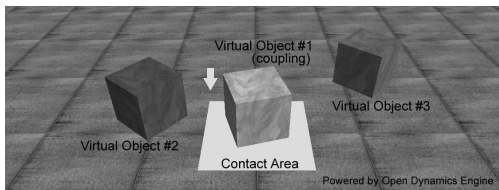


図 10 実験の様子

Fig. 10 View of experiments.

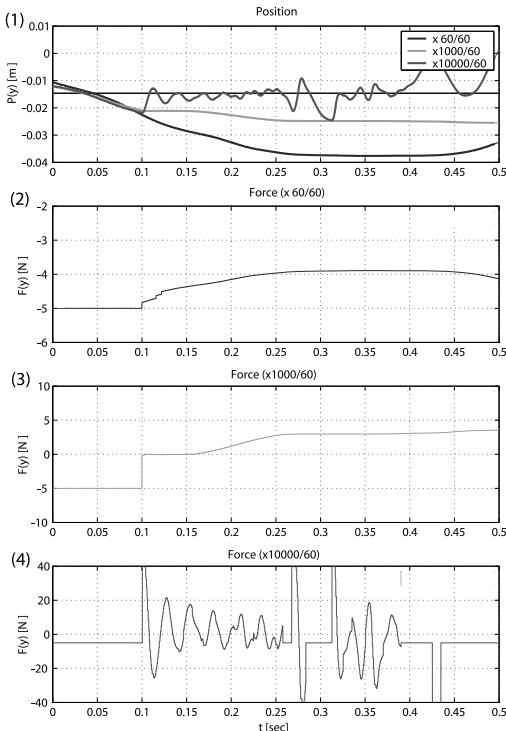


図 11 実験 1 : VC k=100 (一定), IHR なし

Fig. 11 Ex. 1 (VC k=100 without IHR).

比は $\times 1000/60$ である．実験結果を図 11 に示す．

実験結果より，逡倍しない ($\times 60/60$) 場合 (図 11 (2)) では，面の提示位置が大きくずれることが分

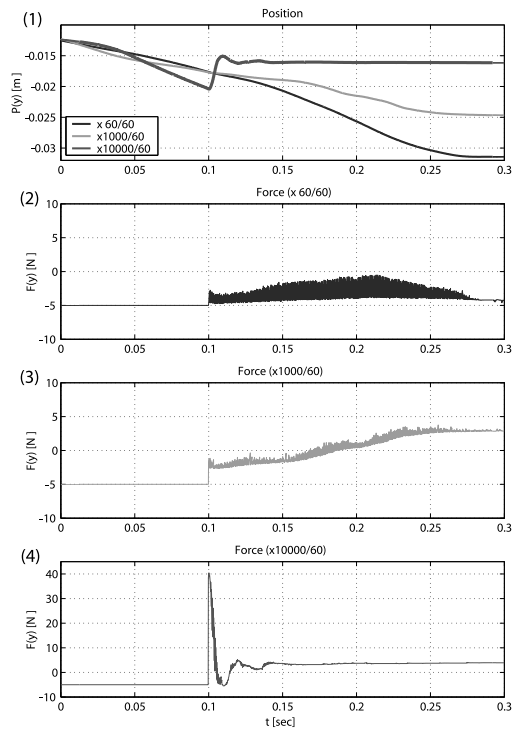


図 12 実験 2 : VC k=100 (一定), IHR k=100 (一定)

Fig. 12 Ex. 2 (VC k=100, IHR k=100).

る．ここでは，面のクオリティ（忠実性）を実現することができない．一方，1 kHz の周波数比 $\times 1000/60$ (図 11 (3)) では，発振せず安定に提示面を提示できていることが分かる．これは，実際の周波数比と等しいことから周波数比による補間が妥当であることが分かる．また，倍率 $\times 10000/60$ (図 11 (4)) では，実際の周波数比は 1 kHz であるので，実際の周波数比に比べて 10 倍大きな倍率を適用していることになる．そのためゲインが大きすぎ，発振を起こしやすく面の提示が困難であった．よって，10 kHz による面に関する力覚補間を適用することによる性能変化を調べる必要がある．

8.1.2 実験 2

次に，バーチャルカップリングで接続し，提示面に関する力覚補間を適用して周波数比を変えた場合 ($\times 60/60$, $\times 1000/60$, $\times 10000/60$) の影響を調べる．10 kHz の面の力覚補間を適用するので，実際の周波数比は $\times 10000/60$ である．実験結果を図 12 に示す．

実験結果より，周波数比で逡倍しない ($\times 60/60$) 場合では，力覚補間を適用しても，元となるカップリング係数自身が低い値のために有効ではない．また，周波数比 $\times 1000/60$ (図 12 (3)) の場合，実験 1 の結果と同様の波形が得られた．ただ，提示時に補間のため

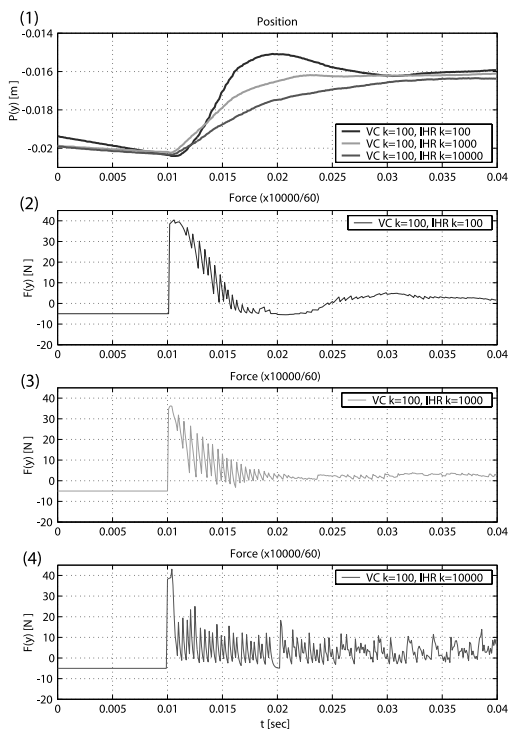


図 13 実験 3 : VC $k=100$ (一定), IHR $k=100, 1000, 10000$
 Fig. 13 Ex. 3 (VC $k=100$, IHR $k=100, 1000, 10000$).

細かい波形が生成されている。一方、10 kHz の周波数比 $\times 10000/60$ (図 12(4)) では、実際の周波数比と等しいことから、実験 1 での危険な発振もなく、安定に面を提示していることが分かる。

以上の実験 1, 2 より、剛体シミュレータがビデオレート (60 Hz) で実行されているにもかかわらず、周波数比と面情報の力覚補間による 10 kHz での力覚提示を行うことで、安定で提示面のクオリティ (忠実性) の高い力覚提示が可能になることが分かる。

8.1.3 実験 3

最後に、提案手法における力覚補間レンダリングの補間パラメータを変化させたときの提示面への影響を調べる。面に関する力覚補間の係数は $k=100, 1000, 10000$ [N/m] の 3 つで行った。また、この場合の周波数比は面に関する補間を行うので $\times 10000/60$ である。実験結果を図 13 に示す。また、設定パラメータが等しい図 13(2) の波形と図 12(4) の波形は同一の波形であり、時間軸のスケールが異なるだけである。

実験結果より、提示面の収束 (図 13(1)) を見ると、提示面情報の補間パラメータを適宜調整することで、より安定に提示面に収束することが分かる。また、補間のパラメータを大きくすると、細かい波形が多く生成されるが、計算機シミュレーションと同様の傾向で

あり、ある程度までの波形ならば、提示面の硬さに寄与すると考えられる。しかし、大きくしすぎると、危険な発振ではないが細かいノイズがより多く発生し、提示面への収束も遅くなることが分かる。また、パラメータを変化させた場合、接触直後の細かい波形に違いが生じるが、これによる提示面の材質の変化は、今後の課題とする。

9. まとめ

約 160 倍のアップサンプリングを実現する 2 段構成のマルチレートシステムにより、パーチャルカップリングによる操作の安定性と、力覚補間レンダリングによる接触時の提示面の硬さ、すなわち忠実性の両立を提案した。提案手法の計算機シミュレーション結果から、実際のカップリング係数は低いにもかかわらず、剛体接触時の力覚提示が提案した力覚補間により、あたかもカップリング係数を高い値にしたかのような振舞いをする事が分かった。また、6 自由度の力覚提示装置において剛体接触の評価実験を行い、剛体接触時の位置と提示力を 10 kHz で計測し、各種パラメータの変化によりどのように提示力の変化があるかを調べた。そして、提案する更新周波数比と提示面情報による補間により、VR 世界がビデオレートという力覚提示には非常に低更新周波数にもかかわらず、安定に力覚クオリティの高い提示面を提示できることが分かった。これは、力覚提示を考慮されずに開発された一般的な VR アプリケーションにおいても、安定性と忠実性を両立させた高解像度力覚レンダリングが可能になることを意味する。

今後の課題としては、今回は剛体の接触時についての評価実験を行ったが、剛体のはめ込み操作など、接触点が多くなり提示力の方向変化が激しい場合の状況において、提案手法の有効性を示す必要があると考える。

参考文献

- 1) Adachi, Y., Kumano, T. and Ogino, K.: Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects, *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.203–210 (1995).
- 2) Adams, R.J. and Hannaford, B.: Control Law Design for Haptic Interfaces to Virtual Reality, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol.10, pp.1–12 (2002).
- 3) Okamura, A.M., Hage, M.W., Dennerlein, J.T. and Cutkosky, M.R.: Improving Reality-Based Models for Vibration Feedback, *Proc.*

- ASME Dynamic Systems and Control Division*, Vol.69, No.2, pp.1117–1124 (2000).
- 4) Baraff, D.: Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies, *Computer Graphics*, Vol.23 (1989).
 - 5) Barbagli, Prattichizzo and Salisbury: Multirate analysis of haptic interaction stability with deformable objects, *IEEE Decision and Control* (2002).
 - 6) Cavusoglu and Tendick: Multirate simulation for high fidelity haptic interaction with deformable object in virtual environments, *ICRA* (2000).
 - 7) Colgate, J.E. and Schinkel, G.: Factors affecting the z-width of a haptic display, *Proc. IEEE ICRA*, pp.3205–3210 (1994).
 - 8) Colgate, J.E., Stanley, M.C. and Brown, J.M.: Issues in the haptic display of tool use, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, PA, pp.140–145 (1995).
 - 9) Colgate, J.E., Grafing, P.E., Stanley, M.C. and Schenkel, G.: Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces, *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.202–208 (1993).
 - 10) Kim, J., Sylvia, I., Ko, H. and Sato, M.: *Integration of Physics Based Simulation with Haptic Interfaces for VR Applications*, HCI International (2005).
 - 11) Kuchenbecker, K.J. Fiene, J. and Niemeyer, G.: Improving Contact Realism through Event-Based Haptic Feedback, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, No.2, pp.219–230 (2006).
 - 12) Love, L. and Book, W.: Contact Stability Analysis of Virtual Walls, *Proc. Dynamic Systems and Control Division ASME*, pp.689–694 (1995).
 - 13) Minsky, M., Ouh-Young, M., Steele, O., Brooks, F.P. and Behensky, M.: Feeling and Seeing Issues in Force Display, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.235–243, ACM (1990).
 - 14) Novodex. <http://www.novodex.com/>
 - 15) SMITH R.: Open dynamics engine. <http://opende.sourceforge.net/>
 - 16) SPRING HEAD. <http://springhead.info/>
 - 17) Terzopoulos, D., Platt, J.C. and Barr, A.H.: Elastically deformable models, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, Vol.21, pp.205–214, (1987).
 - 18) Yanlin, L., Murayama, J., Akahane, K., Hasegawa, S. and Sato, M.: Development of new force feedback interface for tow-handed 6DOF manipulation—SPIDAR-G&G system, *Proc. 13th Int. Conf. on Artificial reality and Telexistence*, pp.166–172 (2003).
 - 19) Zilles, C. and Salisbury, J.K.: A constraint-based god-object method for haptic display, In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Vol.3, pp.146–151 (1995).
 - 20) 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤 誠: 10 kHz の更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.9, No.3, pp.217–226 (2004).
 - 21) 井上雅晴, 長谷川晶一, 金 時学, 佐藤 誠: 二次計画法を用いたワイヤ駆動力覚ディスプレイのための張力計算アルゴリズム, *日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文誌*, pp.91–94 (2002).
 - 22) 岩下 克, 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤 誠: 局所的な動力学計算を行う力覚レンダリング, *ヒューマンインタフェース学会研究報告集*, Vol.7, No.3, pp.73–78 (2005).
 - 23) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J74-D-2, No.7, pp.887–894 (1991).
 - 24) 長谷川晶一, 石井雅博, 佐藤 誠, 小池康晴: 力積ディスプレイをもつ動的な仮想世界のための力積に基づくプロセス間通信, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1758–1765 (1999).
 - 25) 長谷川晶一, 藤井伸旭, 赤羽克仁, 小池康晴, 佐藤 誠: 力覚インタラクションのための多面体の接触体積に基づく実時間剛体運動シミュレーション, *計測自動制御学会論文集*, Vol.40, No.2, pp.122–131 (2004).
 - 26) 長谷川晶一, 赤羽克仁, 岩下 克, 小池康晴, 佐藤 誠: 高解像度力覚インタフェースをもつ物理ベース VR システムの開発, *電子情報通信学会論文誌 D-I*, Vol.J88-D-I, No.2, pp.431–438 (2005).
 - 27) 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.5 (2004).
 - 28) 仁木 亨, 下条 誠: 高速応答性を目的とした簡易型ハプティックディスプレイの開発, *日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文誌*, pp.131–132 (1999).

(平成 18 年 6 月 21 日受付)

(平成 18 年 12 月 7 日採録)



赤羽 克仁

2002年東京工業大学工学部情報工学科卒業，2004年同大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻修士課程修了．現在，同大学院博士後期課程在学中．力覚インタフェースに関する研究に従事．

に関する研究に従事．



佐藤 誠（正会員）

1973年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業，1978年同大学院博士課程修了．同年同大学工学部助手，現在，同大学精密工学研究所教授．パターン認識，画像処理，ヒューマンインタフェースの研究に従事．工学博士．

マンインタフェースの研究に従事．工学博士．



小池 康晴

1987年東京工業大学工学部情報工学科卒業，1989年同大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修了．同年トヨタ自動車（株）入社，1991年ATR視聴覚機構研究所出向，1992年ATR人間情報通信研究所．1994年トヨタ自動車（株）に戻る．1998年東京工業大学精密工学研究所助教授，現在に至る．運動制御の神経回路網の研究に従事．工学博士．

1994年トヨタ自動車（株）に戻る．1998年東京工業大学精密工学研究所助教授，現在に至る．運動制御の神経回路網の研究に従事．工学博士．

