

マルチレートな剛体力覚提示システムのための 6 自由度力覚レンダリング手法の提案

A 6-DOF Haptic Rendering Algorithm for Multirate Haptic Display System of Rigid Bodies

須佐 育弥¹⁾, 長谷川 晶一²⁾

Ikumi SUSU and Shoichi HASEGAWA

1) 電気通信大学 知能機械工学専攻

(〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1 東 4 号館 313 室, susa@hi.mce.uec.ac.jp)

2) 東京工業大学 精密工学研究所

(〒 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259 R2-20 R2 棟 624 室, hase@pi.titech.ac.jp)

Abstract : In this paper, we propose a 6-DoF haptic rendering method on multirate haptic display system. We extend Adachi's *intermediate representation* for the 6-DoF haptic rendering. The extended *intermediate representation* consists of a plane and vertices. The *intermediate representation* is created in a physics process, which is updated at high frequency, and transmitted to a haptic process, which is updated at low frequency. Then, we adopt Yokoyama's constraint-based haptic rendering method for displaying stable torque. Finally, we investigated effectiveness of the proposal method.

Key Words: 6-dof haptic rendering, intermediate representation, force feedback, multirate

1. はじめに

近年, 物理シミュレーションされたバーチャル世界に対して, 力覚インタフェースを利用した力覚インタラクションができるシステム, 力覚提示システムについての研究が盛んに行われている.

研究の課題として, 6 自由度の力覚提示が挙げられる. 人間は普段から 6 自由度操作をし, 6 自由度の力覚を得ている. そのため, バーチャル世界との力覚インタラクションについても直感的な操作を実現させるためには, 6 自由度力覚提示が必要であると考えられる.

2. 先行研究

2.1 マルチレート力覚提示システムと 6 自由度力覚提示

物理シミュレーションのための計算時間を確保できるよう, 力覚インタフェースの制御と物理シミュレーションを同じプロセスで実行させずに, 力覚インタフェースの制御を高速に行う力覚プロセスと物理シミュレーションを低速に行う物理プロセスに分け, 定期的にプロセス間で通信をさせるマルチレート力覚提示システムが提案されている [4]. このように力覚提示システムを構成することで, 複雑なバーチャル世界を構築することができる.

また, マルチレート力覚提示システム上で 6 自由度の力覚提示を実現する力覚レンダリング手法がいくつか提案さ

れている.

Otaduy ら [1] は力覚ポインタ (バーチャル世界内でユーザが操作する物体) をペナルティ法の物理シミュレーションで運動させ, 力覚ポインタと力覚インタフェースをバーチャルカップリングさせる手法を提案している. バーチャルカップリングは力覚ポインタの質量が大きい場合にその慣性の影響で提示力を抑制したり, 力覚ポインタのシミュレーションの更新が低速の場合に力覚ポインタと力覚インタフェース間の距離の関係で提示力が発振する問題が起きる. しかし, Otaduy らは物理シミュレーションに陰積分を用いることで, 力覚ポインタの質量を小さくし, 上述の問題を低減させることに成功している.

Ortega ら [2] は拘束ベースの力覚レンダリング手法を提案している. この手法は力覚ポインタが他のバーチャル物体と接触している時の力覚ポインタの拘束加速度と接触していないと仮定した時の非拘束加速度の差から提示力を計算している. この手法は先程挙げたバーチャルカップリングによる問題が起きないことが特徴である.

以上のように, マルチレート力覚提示システムでは力覚ポインタと力覚インタフェースを何らかの方法でカップリングさせる方法が主流であり, 力覚ポインタと力覚インタフェースを直接接続しているものは少ない.

3. 研究の目的と提案手法

3.1 中間表現を用いた力覚提示

3自由度力覚レンダリングでは Adachi ら [4] が提案する中間表現を用いた力覚レンダリング手法がある。中間表現は力覚ポイントと力覚ポイント近傍の物体の位置関係を平面や点など簡単な表現に変換させたものである。力覚ポイントを点、近傍物体を平面とし、力覚ポイントが平面に侵入する量に応じて力を計算し、提示力としている。

Berkelman ら [3] は中間表現を多点接触が扱えるように拡張することで、6自由度力覚提示を提案しているが、この手法では接触点毎に侵入量にバネ係数を掛けたものを力とし、その力の和をユーザへの提示力としている。そのため、接触点の増加とともに反力が大きくなり、接触状態によっては提示力が大きく変化してしまう。

3.2 中間表現の拡張についての提案

以上のことから、中間表現を従来から扱われていた点と平面から点群と平面へと拡張し、6自由度に対応させた拘束条件を立て、力覚ポイントがバーチャル物体から侵入を解除するための力、トルクをレンダリングすることができれば、マルチレートシステムでの安定な6自由度力覚提示が実現できると考えられる。

本稿では6自由度力覚レンダリングのための中間表現の拡張方法及び力覚提示システムの実装方法について説明する。そして、提案手法を実装した力覚提示システムの力覚レンダリングの評価により、提案手法の有効性について記す。

4. 提案手法の実装

本章では提案手法を適応させたマルチレート力覚提示システムの実装方法について説明する。

4.1 システム構成

図1に提案手法を実現するためのシステム構成図を示す。本稿では物理プロセスで実行される近傍物体探索と中間表現の作成、力覚プロセスで実行される6自由度力覚レンダリングについて説明する。

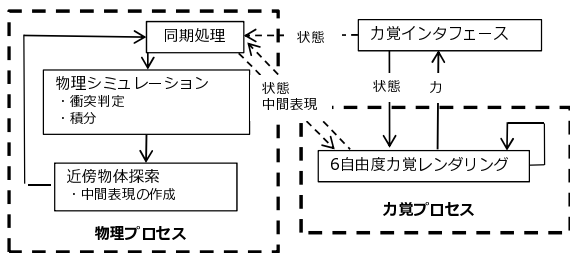


図1: システム構成

4.2 6自由度力覚レンダリングのための中間表現

本節では6自由度力覚レンダリングのための中間表現の作成方法について説明する。はじめに中間表現を作成するための準備について説明し、その後中間表現の作成について説明する。

4.2.1 力覚ポイント近傍の物体の探索

本研究では、力覚ポイントについて、ある程度の大きさを持たせたバウンディングボックスを作り、*sweep and prune* で大域接触判定を行う。そして、力覚ポイントとある程度絞られたバーチャル物体について *GJK* アルゴリズムを使い、最近傍点対を見つける。最後に最近傍点対の距離と任意に設定する閾値により、バーチャル物体を近傍物体と決定する。

4.2.2 侵入形状の頂点の取得

次に力覚ポイントと前項で取得した近傍物体の侵入形状の頂点の取得方法について説明する。

侵入形状の取得は Muller と Preparata ら [6] が提案する方法を用いる。この方法は力覚ポイント近傍の物体を取得する際に求める最近傍点対の中点を原点として、力覚ポイントの面と近傍物体の面について面を点に変換する双対変換を行う。そして、双対変換された点群を含む最小の凸包を求め、凸包の面に対して双対変換を行うことで侵入形状の頂点を取得することができる。

4.2.3 中間表現の作成

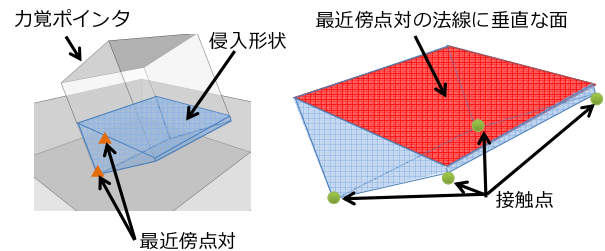


図2: 6自由度力覚レンダリングのための中間表現

最後に中間表現の作成方法について説明する。まず、力覚ポイント近傍の物体、近傍物体は平面として変換する。この平面は4.2.1項で得られる力覚ポイントと近傍物体の最近傍点対を結ぶベクトルを法線として、近傍物体側の最近傍点が載る平面とする。次に力覚ポイントは点群（以下、接触点群と呼ぶ）として変換する。接触点群は4.2.2項で得た侵入形状の頂点とするが、近傍物体を表す平面上に載っている頂点は接触点群には含まない。例えば、提案する中間表現は図2のように表すことができる。中間表現をこのように表すことで、面-点、面-稜線、面-面接触など多様な接触状態に対応することができる。

以上のように作成した中間表現を6自由度力覚レンダリングを行う力覚プロセスへ送信する。送信する情報は次のようになる。

- 平面を表す法線ベクトルと点の位置
- 接触点群の位置

ただし、送信の際、接触点群は力覚ポイントのローカル座標系とする。

4.3 6自由度力覚レンダリング

本研究では横山ら [5] が提案する拘束ベースのレンダリングを採用する．この手法は力覚ポイントと近傍物体が接触または侵入した際に，力覚ポイントが剛体に侵入しない状態にまで動かす量（以下，侵入解除量と呼ぶ）を計算し，侵入解除量にバネダンパ係数を掛け，提示力を計算する．本項では力覚プロセス 1 ステップ間で行う力覚レンダリングの方法について説明する．

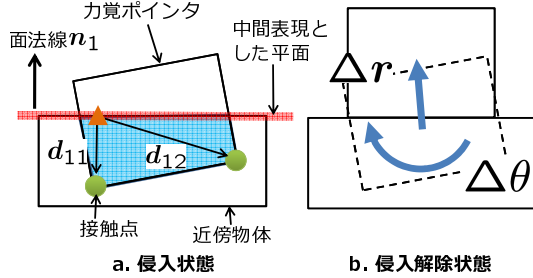


図 3: 力覚ポイントの侵入解除

図 3 のように力覚ポイントが近傍物体に侵入している状況を考える．まず，平面の法線を n_i とし，4.2.3 項で作成した中間表現とした平面上の最近傍点から接触点群へのベクトルを d_{ij} とする． i は力覚ポイントが侵入する i 番目の中間表現の面を表し， j は i 番目の中間表現の面に侵入する j 番目の接触点である．また，接触点群は力覚ポイントのローカル座標系であるのでワールド座標系に変換しておく．ここで，ベクトル d_{ij} と平面の法線 n_i との内積をとり， $d_{ij} \cdot n_i < 0$ であれば接触点は中間表現（近傍物体）に侵入していると判定する．そして，近傍物体に侵入している接触点が侵入解除，つまり内積が $d_{ij} \cdot n_i \geq 0$ となるように近傍物体の並進量，回転量を計算する．

接触点の侵入解除のための条件式は

$$\Delta \theta \times r_{ij} + \Delta r \geq \|d_{ij} \cdot n_i\| n_i \quad (1)$$

と書ける．ここで， r_{ij} は力覚ポイントの重心から接触点までのベクトル， Δr は力覚ポイント侵入解除の微小並進量， $\Delta \theta$ は力覚ポイント侵入解除の微小回転量である．そして，条件式 (1) を満たす Δr ， $\Delta \theta$ を求めるのだが，解法は横山らの論文 [5] を参照されたし．

最後に提示力，提示トルクの計算について説明する．提示力 f_d ，提示トルク τ_d の計算は侵入解除量 Δr ， $\Delta \theta$ を用いて，

$$f_d(t) = k \Delta r(t) + d \frac{\Delta r(t) - \Delta r(t - \Delta t^L)}{\Delta t^L} \quad (2)$$

$$\tau_d(t) = k \Delta \theta(t) + d \frac{\Delta \theta(t) - \Delta \theta(t - \Delta t^L)}{\Delta t^L} \quad (3)$$

となる．ただし， k はバネ係数， d はダンパ係数， Δt^L は力覚プロセスの更新時間である．

本項では力覚プロセス 1 ステップの間の力覚レンダリングについて説明した．実装の際は物理プロセス 1 ステップの間で複数回力覚プロセスを回すので，その間の力覚ポイン

タと近傍物体の接触状態は線形的に変化すると仮定し，平面と接触点群は補間を行いながら力覚レンダリングを行う．

5. 評価

提案手法を実装したシステムについて 6 自由度の力覚提示が行えているかを評価するための実験を行った．

5.1 実験環境

実験環境は計算機 (Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 2.33GHz)，力覚インタフェース SPIDAR-G6，物理シミュレータ Springhead2 で構成した．システムの更新周期は物理プロセスを 50ms，力覚プロセスを 1ms と設定した．

5.2 実験内容

実験は図 4 のように力覚ポイント进行操作する．手順は以下の通りである．

- 力覚ポイントを 45 度回転し， y 軸負方向に移動させ，稜線と床面を接触させる．
- 力覚ポイントの稜線と床面を接触させた状態で，力覚ポイントを z 軸負方向に回転させる．
- 力覚ポイントの面を床面に接触させる．

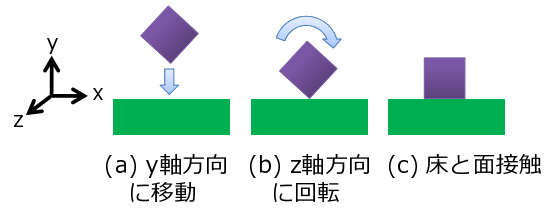


図 4: 実験中の操作

これらの操作を実行している間，力覚ポイントの位置，姿勢と力覚ポイントが受ける力，トルクを計測し，力，トルクの計算が妥当であるか検証した．また，実験条件として，力覚ポイントの形状は 1 辺 0.2m の立方体で力覚ポイントと床との摩擦はなし，力覚レンダリングのためのバネダンパ係数は $k = 9000\text{N/m}$ ， $d = 0\text{Ns/m}$ とした．

5.3 実験結果・考察

実験結果を図 5, 6 に示す．ここで，力覚ポイントについて， y は y 軸方向の重心位置， θ_z は重心 z 軸まわりの回転角度， f_y は y 軸方向に加わる力， τ_z は z 軸まわりに加わるトルクを表す．図 5, 6 の (a)，(b)，(c) は上記の手順 (a)，(b)，(c) を行っている期間に相当する．

まず，期間 (b) で力覚ポイントの稜線と床面が接触し， y 軸正方向に力が発生している．接触した瞬間は反力， y 軸正方向に力覚ポイントの重心位置があるため， z 軸まわりのトルクは発生していないが，力覚ポイントを徐々に回転させることで， z 軸まわり負方向のトルクが増加していることがわかる．そして，力覚ポイントの傾きが 0 度に近づくとトルクの大きさは最大となり，傾きが 0 度になった時点で急激にトルクの大きさが小さくなった．

このことから提示トルク τ_z の計算は力覚ポイントの傾きに応じて正しく計算されていることがわかる．ただし，図 5

の 3.8 s 付近で y 軸方向の提示力 f_y が 3 N から 2 N へ一旦低下し、その後 3.5 N に増加していることが確認できる。この f_y の変化は力覚ポイントの接触状態と力覚ポイントの床面への侵入量が関係していると考えられる。また、この時の力覚ポイントの z 軸まわりの回転は 0 度に向かう寸前である。つまり、力覚ポイントの接触は 2 点の接触点で構成される稜線接触が 4 点の接触点から成る面接触へ向かう状態である。この接触状態の変化の過程で、力覚ポイントと床面との侵入が浅くなり、一旦提示力が低下し、面接触になることで、再び侵入量が増加し、提示力が増加したと考えられる。

加えて、トルクについては (c) の力覚ポイントが床面に面接触している際にも -0.2Nm 程度発生している。これは、力覚ポイントの面が床面に対して完全に平行で接触していないために発生していると考えられる。力覚ポイントの姿勢はユーザの操作により決定されるが、ユーザが力覚ポイントを精密に操作することは難しいため、若干のトルクの発生は避けられない。

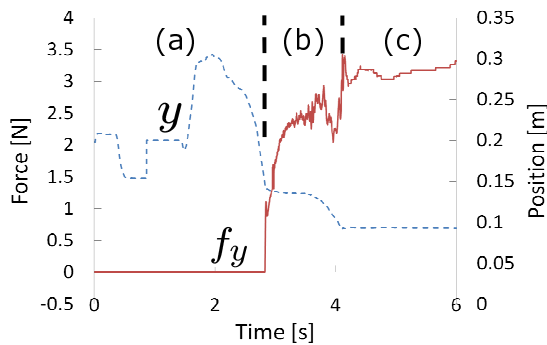


図 5: 力覚ポイント y 方向の位置, 加わる力

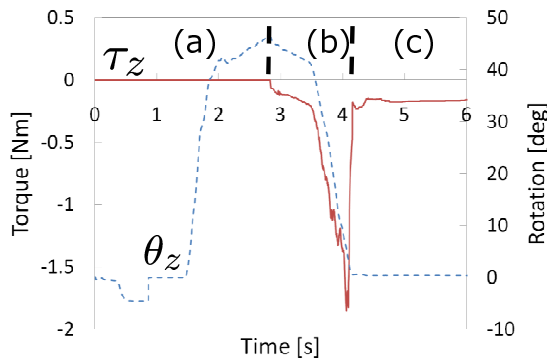


図 6: 力覚ポイント z 軸まわりの角度, 加わるトルク

6. 考察

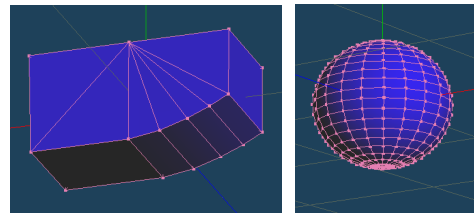
6.1 力覚ポイントの形状による侵入解除計算への影響

力覚ポイントの形状を図 7 のように変更し、バーチャル世界内にある床面と接触させ、回転させる等の操作を行い、力覚ポイントの侵入解除計算への影響を調べた。

図 7.(a) の操作では、頂点が少ない部分を接触させ頂点数が多い方へと回転させたところ、力覚ポイントの形状に合わせて抗力が発生し、並進力およびトルクを感じるこ

ができた。また、床面に出来る限り押し付けたところ、図 7.(a) の下面の頂点が全て侵入するが、頂点数で提示力が極端に変化することはなかった。

次に図 7.(b) の形状では、床面に接触させると多数の頂点が侵入するため、実時間で侵入解除の計算が完了せず、力覚提示は不安定であった。このことから、多大な頂点で構成される形状を力覚ポイントとして利用するのは適さない。



(a)頂点に偏りがある物体 頂点数:18
(b)頂点が多い物体 頂点数:230

図 7: 力覚ポイント形状

7. まとめと今後の課題

本稿ではマルチレートな剛体力覚提示システムのための 6 自由度力覚提示手法について提案した。そして、提案手法を実装したシステムを用い力覚レンダリングの評価を行った。また、力覚ポイントの形状について考察を行い、形状の頂点数が重要であることを確認した。

今後の課題として、今回提案した手法では摩擦について考慮していないため、摩擦機能の付加や物体の把持操作の検討等が挙げられる。

参考文献

- [1] Miguel A. Otaduy and Ming C. Lin: A Modular Haptic Rendering Algorithm for Stable and Transparent 6-DoF Manipulation; In IEEE Transactions on Robotics, Vol. 22(4), pp. 751-762. (2006)
- [2] M. Ortega, S. Redon, S. Coquillart: A Six Degree-of-Freedom God-Object Method for Haptic Display of Rigid Bodies; IEEE Virtual Reality 2006, USA (2006)
- [3] Peter J. Berkelman, Ralph L. Hollis: Lorentz Magnetic Levitation for Haptic Interaction: Device Design, Performance, and Integration with Physical Simulations; The International Journal of Robotics Research, Vol.19, No.7, pp.644-667 (2000 7)
- [4] Y. Adachi, T. Kumano, K. Ogino: Intermediate representation for stiff virtual objects; Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp.203-210 (1995)
- [5] 横山 哲也, 飯田 佳弘: デジタルモックアップのための剛体運動シミュレーションに関する研究; 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.4, pp51-56 (2002)
- [6] D. E. Muller and F.P.Preparata: Finding the intersection of two convex; Theoretical Computer Science, Vol.7, No.2, pp.217-236 (1978)