

力覚計算と更新周期

電気通信大学知能機械工学科
長谷川晶一

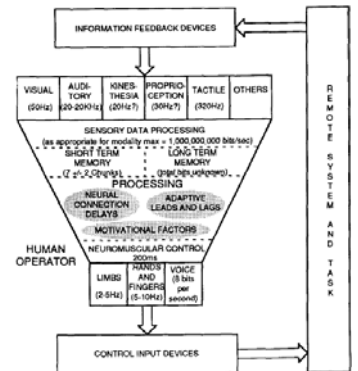
必要な更新周期は？

1kHz for 70kN/m,
100Hz for 6.7kN/m

[Love and Book 1995]

1kHz: 1kg重で0.14mmの侵入
100Hz: 1kg重で1.5mmの侵入

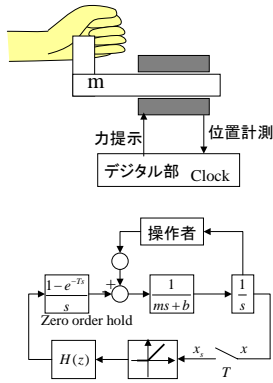
私の感覚はSPIDARとはちょっと合わない。
おそらく、機構の粘性や摩擦が大きい。



[T.L.Brooks 1990]

安定になる更新周期 [J.E.Colgate and G.Schenkel 1997] を紹介

- 1自由度
- 位置計測・力出力



デジタル部分

- $H(z) = K + B \frac{z-1}{Tz}$
- T: 制御周期
- K: バーチャル壁のバネK
- B: ダンパ B

■ 実デバイス部分

- m: デバイスの質量
- b: デバイスの粘性

安定になる更新周期

■ 証明が論文 J.E.Colgate and G.Schenkel:
Passivity of a Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces 1997,
Journal of Robotic Systems 14(1), 37-47 (1997)

にあります、 $b > \frac{T}{2} \frac{1}{1 - \cos \omega T} \operatorname{Re} \{ (1 - e^{j\omega T}) H(e^{j\omega T}) \}$
 $0 \leq \omega \leq \omega_N = \pi/T$

$$b > \frac{KT}{2} - B \cos \omega T \quad 0 \leq \omega \leq \omega_N$$

$$b > \frac{KT}{2} + B$$

と出てきます。

- 機構にダンパ性 b が必須。
- T が大きいと K を大きく出来ない。
- ところで、B (壁のダンパ) は逆効果？
⇒ 普通、b は高域ほど大きいので、効果がある
($\omega < \omega_N$ が小さいときは、 $b > \frac{KT}{2} - B$ に近くなる)
- 1kHzは制御のため(だけ)に必要な

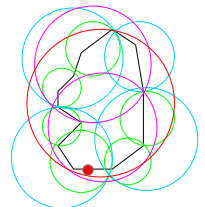
目次

- 1kHzを実現するための力覚計算
 - 衝突判定の高速化
 - Bounding Volumeの階層化による高速化
 - 力覚ポイントが形状を持つ場合の計算
 - Point Cloud モデル
 - 凸多面体モデル
- 低速な物理シミュレータとの接続
 - 1ステップが低速な物理シミュレータを利用するには
 - 拘束解消法(LCPなど)の物理シミュレータとの接続法

Bounding Volumeの階層化による高速化

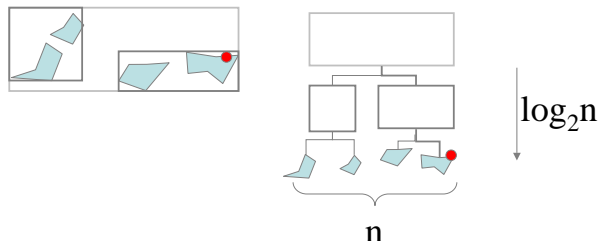
- 階層的にBounding Volume (Ruspini 97では球) [Ruspini et.al. SIGGRAPH 97] でポリゴンを覆う。

- ポリゴン数が多いときに有効
- 力覚ポイントの接触判定は、まず、一番外側の球(赤)と判定。もし当たっていたら、紫と判定。紫と当たっていたら...最後にポリゴン(黒)と判定



Bouding Volume自体の階層化

- 物体数が多い場合に有効
- 物体数 n に対して、 $\log_2 n$ 回の判定で済む

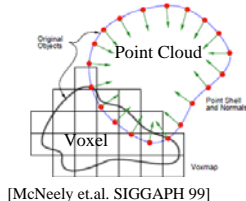


6自由度力覚レンダリング

- 3自由度力覚レンダリング
 - 力覚ポイントは点
 - 接触対象の形状とポイントの点の距離を計算
- 6自由度力覚レンダリング
 - 力覚ポイントが形状を持つ
 - 接触対象の形状とポイントの形状の距離を計算

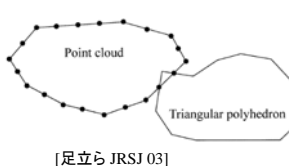
力覚ポイントにPoint Cloudを用いる方法

- 力覚ポイントをPoint Cloud、静止物体をVoxelやポリゴンでモデル化
- 判定が単純で高速



[McNeely et al. SIGGRAPH 99]

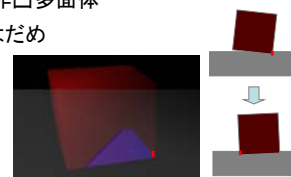
- 欠点
 - 特殊なモデルが必要
 - 静止物体が多い場合専用



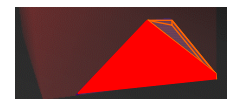
[足立ら JRSJ 03]

形状に、凸多面体を用いる方法

- 凸多面体
 - 凸多面体
 - 非凸多面体
- 最侵入点でのペナルティ法はだめ

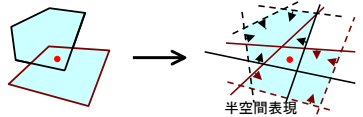


- 体積を計算すればOK
 - 高速計算法
 - 1. 物体は凸多角形でモデル化
 - 2. GJKで共有点を1つ見つける
 - 3. [Muller and Preparata 1978]で共有部分の凸多角形を高速計算

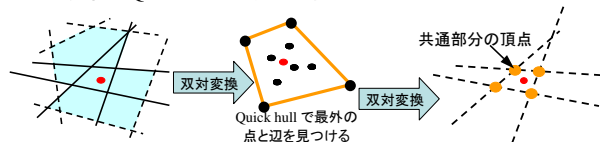


[Muller and Preparata 1978] を簡単に紹介

- 2つの凸多面体の共通部分は、半空間表現のAND



- 双対変換とQuick Hullで欲しい情報を取り出す



- 双対変換とは？

- 距離を逆数に
- 点を線に、線を点に



物理シミュレーションと力覚レンダリング

- 剛体の運動



- v: 速度
- ω : 角速度
- m: 質量
- I: 慣性テンソル
- f: 外力

運動方程式

$$m\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\tau}$$

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{f}\Delta t / m$$

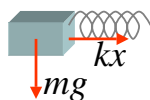
$$\mathbf{I}(t + \Delta t)\boldsymbol{\omega}(t + \Delta t) = \mathbf{I}(t)\boldsymbol{\omega}(t) + \boldsymbol{\tau}\Delta t$$

$\mathbf{f} = 0, \boldsymbol{\tau} = 0$ ならば、速度一定・角運動量一定

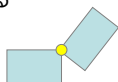


剛体に働く力

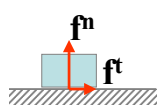
- 重力 → $f=mg$... 定数
- パネ → $f=kx$... 位置に比例
- 拘束力



- 力の大きさは不明
- 剛体同士の位置・速度関係が決まっている
 - 蝶番: 2物体の相対位置が一定
 - 抗力: 2物体が互いに侵入しない
 - 静止摩擦力: 物体が滑らない



- 拘束力(接触力も拘束力的一种)の計算が難しい
⇒ 物理シミュレーションの主な仕事



13

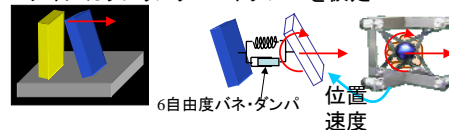
物理シミュレータと力覚レンダリングの関係

- 物理シミュレータ ⇒ 任意形状同士の接触力を計算
⇒ 6自由度力覚レンダリング

- シミュレータ内で加わった接触力をそのまま提示 ⇒ Δ
 - ペナルティ法ならばOK. 解析法だと提示力が撃力になる問題あり



- バーチャルカップリング: パネダンパを仮定



1kHzは本当に必要か?

- 制御には必要

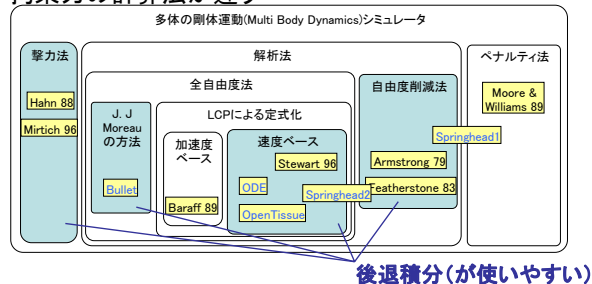
- 人の感覚としては必要ない
 - テレオペレーションシステムで、スレーブロボットは10~20Hzの帯域幅でよい
 - スレーブからマスターへのフィードバックは20~320Hzあると良い

[T.L.Brooks 90]

- 人間には、1kHzのループは不要なのでは?

物理シミュレータの種類

- 拘束力の計算法が違う



- 速度ベース・加速度ベース: 拘束条件の書き方

- 速度ベース: 侵入しない = 相対速度 ≥ 0
- 加速度ベース: 侵入しない = 相対加速度 ≥ 0

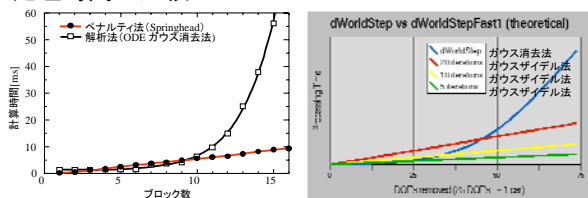
16

更新周期と計算量

- 解析法のシミュレータ

- 後退積分だから安定 ⇒ Δtを大きくできる
- シミュレーション1ステップには時間がかかる。

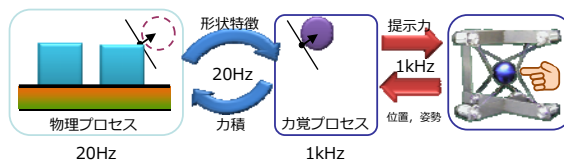
- 処理時間の比較



- ガウスザイデル法(近似解法)を使うとそこまで遅くない

ポイント付近だけ1kHz

- 物理は20Hz 力覚は1kHz
- 力覚プロセスで何をすればよいか?

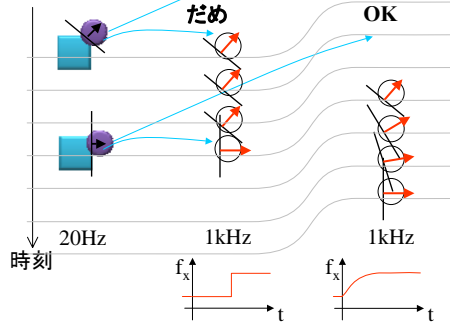


[Adacheら 1995: "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects"]

力覚プロセスの処理での注意

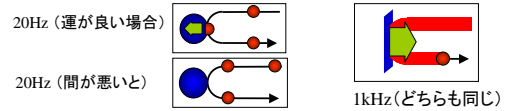
■ 提示力は連続に

- 力触覚は高域で敏感⇒不連続な提示力はだめ。



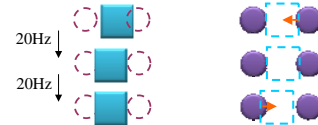
力覚プロセスの処理での注意点

■ 物理プロセスで接触判定をするため



- 1kHzで力積を計算して、20Hz(物理シミュ)に返せばOK [長谷川ら 1999]

■ 制御のループに注意: 把持が発振する

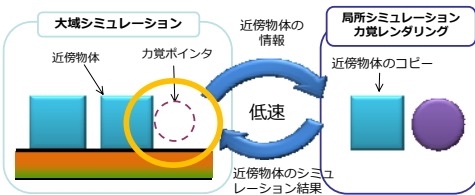


- 力が遅れて伝わる ⇒ 発振

力覚プロセスの処理

■ 遅れをなくすには？

- 力覚ポイント近傍のシミュレーションも行う



[技術展示: T4]

口頭発表: さきほど 2A2-1

大規模バーチャル世界のための高品質力覚提示 |

力覚レンダリングでの工夫

■ イベントベース: 制御しないのも手です

- フィードバック制御 ⇒ 発振
- オープンループで提示: Event-based haptic

- 接触した瞬間に撃力を加える
Braking force pulse
[S.E.Salcudean and T.D.Vlaar 1994]
- 接触時の振動を再現する
[P. Wellman and R. D. Howe 1995]

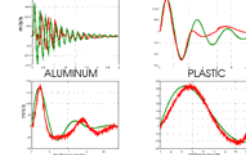
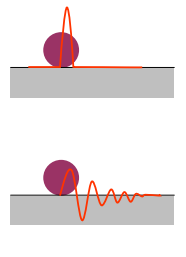


Figure 4 - Typical waveforms played during virtual reality testing (green line) and a recorded waveform at 0.289 m/s impact velocity (red line).



力覚インタフェースで再現

まとめ

■ 安定な制御のために、1kHz以上の更新周期が必要

- 人間の感覚のために必要なわけではない
 - 物理シミュレータ自体は20Hz~50Hzで十分。
 - ただし、力触覚は高域で敏感⇒不連続な提示力はだめ。
 - 把持の問題: 制御のループに注意
 - Event-based haptic = 制御しないのも手

■ 物理シミュレーションは遅くても良い

- 剛体シミュレーションは、後退積分が可能な、解析法のシミュレータで、 Δt を大きくすると高速
- 力覚プロセスでの処理に工夫が必要
 - 提示力を連続に
 - 遅れのあるループが出来ていないか ⇒ 把持の問題
 - 近傍だけを高速シミュレーションすれば、遅れません