

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19700190

研究課題名（和文）： ロボット制御ソフトウェア開発のための
超高速動力学シミュレーション環境研究課題名（英文）： Very fast dynamics simulation environment for designing
robot controller

研究代表者

長谷川 晶一（SHOICHI HASEGAWA）

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号：10323833

研究成果の概要：

本研究では、環境・機構・制御をあわせたシステム全体を安定にシミュレーション可能な超高速ロボットシミュレータを構築する。PD コントローラの LCP への組み込みと自由度削減法によるシミュレーションの統合が実現し、従来の 10 倍程度の大きな時間刻みでも安定に機構と制御のシミュレーションを行うことができる動力学シミュレータを構築することができた。

また、構築したシミュレータを用いて、四足ロボットモデルのシミュレーションを行ったところ、リアルタイムシミュレーションが可能なが確認された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	480,000	3,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：モーションプランニング

1. 研究開始当初の背景

近年、ヒューマノイドロボットやレスキューロボットのような、未知環境で活動するロボットの実用化に向けた研究がなされている。これらの研究では、ロボットの機構とその制御に加え、実環境での自動的・自律的な動作を実現するために必要な行動計画・動作生成のためのソフトウェア・アルゴリズムの開発が重要な課題となっている。ロボットのソフトウェア・アルゴリズムの開発では、計算機

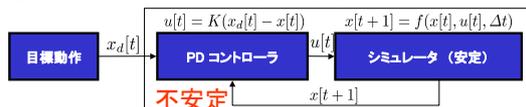
によってロボットと周囲の環境をシミュレーションすることで、実機を使った開発に比べて効率よく開発を進められる。これは、たとえば、ロボットが破損するような動作をさせること、まったく同じ状況を再現すること、接触力など実環境では計測の難しい様々なデータを記録すること、自動的に多数の試行をすることなど、シミュレーションでなければ困難な試行を繰り返しながら開発できるためである。実際 HRP[1]では、Open HRP[2]

というロボットシミュレータを開発してロボットの動作アルゴリズム・ソフトウェアの開発が行われた。また、ロボット工学と人工知能の融合を目的にしたロボット対戦大会 RoboCup[3]では、シミュレーションによる対戦も盛んに行われている。しかし、従来のシミュレータでは、積分誤差のため、時間刻みを小さくしなければ安定なシミュレーションができない。このため、計算量が多くシミュレーションに時間がかかり、開発のボトルネックになっている。とくに強化学習のようにシミュレーションを何万回も繰り返して制御アルゴリズムを学習する場合などでは、シミュレーションの計算時間が大きな問題となる。ところで、近年、ゲームのための動力学シミュレータが多数発表されている[4][5]。これらは、シミュレーションの時間刻みを大きくすることで計算量を低減し、多数の物体が存在する大規模な環境を非常に高速にシミュレーションしている。しかし、これらのシミュレータでロボットをシミュレーションすると、コントローラを含めた安定性が考慮されていないため、積分誤差の累積によってフィードバックループがすぐに発散してしまう。

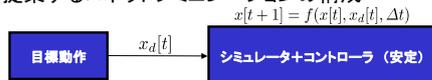
2. 研究の目的

本研究では、環境・機構・制御をあわせたシステム全体を安定にシミュレーション可能な超高速ロボットシミュレータを構築する。

従来のロボットシミュレーションの構成



提案するロボットシミュレーションの構成



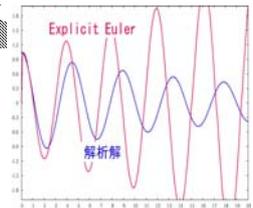
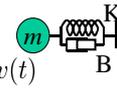
3. 研究の方法

たとえば単純なPD制御(バネダンパ)のシミュレーションを行う場合、時間刻みを大きくすると、右図のように陽積分では不安定になるが陰積分では安定にシミュレーションできることが知られている。しかし、従来のロボットのシミュレーションでは、動力学シミュレータとコントローラが分離しており、陰積分に必要な次の時刻の位置・速度を得ることができない。本研究では、コントローラを拘束条件としてシミュレータに組み込むことで、環境・機構・コントローラの全体を陰積分でシミュレーションし、時間刻みを大きくとっても安定なロボットシミュレーション

バネ・ダンパの運動方程式

$$M\dot{v}(t) = \lambda(t)$$

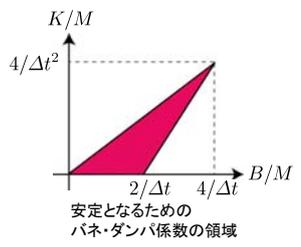
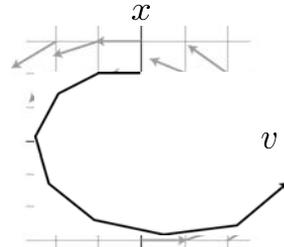
$$\lambda(t) = -Kx(t) - Bv(t)$$



陽積分による差分

$$v[t+1] = v[t] + M^{-1}\lambda[t]\Delta t$$

$$\lambda[t] = -Kx[t] - Bv[t]$$



現在時刻の位置・速度から現在時刻の力を計算→ 積分誤差と不安定化

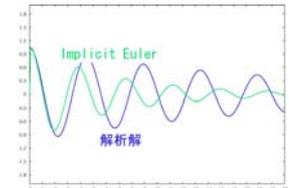
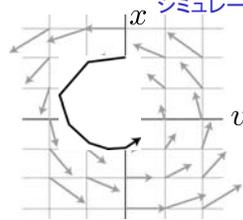
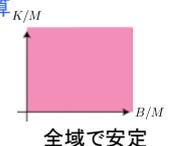
陽積分における不安定性

次の時刻の位置・速度から現在時刻の力を計算

$$v[t+1] = v[t] + M^{-1}\lambda[t]\Delta t$$

$$\lambda[t] = -Kx[t+1] - Bv[t+1]$$

x, v, λ についての拘束条件だと考え
シミュレータに組み込む



陰積分による安定化

を実現する。Anitescu と Potra[6]は、LCP による定式化を用いるの速度ベースのシミュレータ用いて、バネダンパと剛体をあわせて陰積分でシミュレーションする手法を提案している。本研究では、実用的なロボットに用いることができるよう、大規模なシステムのための近似計算の影響を考慮したうえで、より高度なコントローラを含めて安定・高速にシミュレーションする手法を確立する。

参照一覧

- [1] 経済産業省・NEDO「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発」(HRP), 1998-2002.
- [2] OpenHRP, <http://www.is.aist.go.jp/humanoid/openhrp/>, 2000-現在.
- [3] Robocup, <http://www.robocup.org/>, 1992-現在.
- [4] Open Dynamics Engine, <http://ode.org/>, 2000-現在.

[5]PhysX, <http://www.ageia.com/>, 2002-現在

[6]M. Anitescu, F. A. Potra, "A time-stepping method for stiff multibody dynamics with contact and friction", Int. J. Numerical Methods in Engineering 55 (7), 753-784, 2002.

[7]中村, 山根, 永嶋: "構造変化を伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算", "日本ロボット学会誌", vol.16, no.8, pp.124-131, 1998.

3. 研究の方法

これまで構築してきた, 運動方程式と拘束条件を LCP(線形相補問題)に定式化する速度ベースの動力学シミュレータ[8]に, 自由度削減法を用いたシミュレーション手法と, 陰積分による PD コントローラを統合する.

LCP を用いるシミュレータでは, ひとつの拘束条件が LCP の行列(JM⁻¹J^T)の 1 行に対応するが, PD コントローラによる速度変化も拘束条件の一種と考えることができる. そこで, PD コントローラも LCP の行列に加え, 関節や接触による拘束条件とあわせて解く. これにより接触力や関節力といった他の拘束力とあわせて, PD コントローラによる力を, 陰積分を用いてシミュレーションすることができる.

もうひとつの自由度削減法は, 関節でつながった複数の剛体を, 質量行列 M の形式が異なるひとつ物体として扱うことで LCP に統合する. これにより関節拘束への誤差の累積が無くなり, リンク機構など拘束が高精度に満たされる必要のある機構のシミュレーションが可能にする.

参照一覧

[8] 長谷川晶一, 田崎勇一ほか:
" Springhead2 ",
<http://springhead.info/wiki/>, 2005-現在.

4. 研究成果

PD コントローラの LCP への組み込みと自由度削減法によるシミュレーションの統合が実現し, 従来の 10 倍程度の大きな時間刻みでも安定に機構と制御のシミュレーションを行うことができる動力学シミュレータを構築することができた.

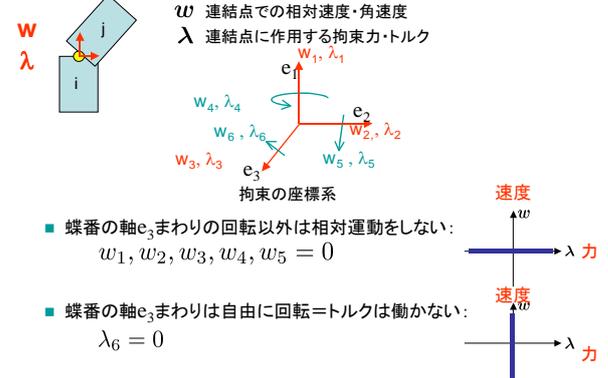
また, 構築したシミュレータを用いて, 四足ロボットモデルのシミュレーションを行ったところ, リアルタイムシミュレーションが可能ながことが確かめられた.

4. 1 バネダンパ制約の組み込み

例えば, 蝶番の制約は下図のように等式で表

現することができる.

■ 関節(蝶番の例、接触などは後で)



LCP を用いた物理エンジンでは, 下式のように, これを運動方程式に組み込み, 連立方程式にして解くことで, 拘束力を計算する.

■ 拘束を考えやすいように、運動方程式を変形

$$\begin{aligned} M\dot{u} &= f_c + f_e = J^T\lambda + f_e \\ u[t+1] &= u[t] + M^{-1}\Delta t J^T\lambda + M^{-1}\Delta t f_e \\ u[t+1] &= u[t] + M^{-1}\Delta t J^T\lambda + M^{-1}\Delta t f_e \\ Ju[t+1] &= Ju[t] + JM^{-1}\Delta t J^T\lambda + JM^{-1}\Delta t f_e \\ w[t+1] &= w[t] + JM^{-1}J^T\Delta t\lambda + JM^{-1}\Delta t f_e \\ w[t+1] &= A\lambda + b \end{aligned}$$

■ 拘束条件と連立させる(蝶番の例)

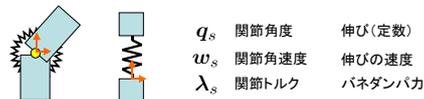
$$\begin{aligned} \text{拘束: } w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 &= 0 \\ \lambda_6 &= 0 \end{aligned}$$

運動方程式に代入:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ 0 \end{bmatrix} + b \quad \leftarrow \text{連立方程式を解いて求める}$$

バネダンパもこれと同様に蝶番と同様に拘束条件と考えると,

■ バネ・ダンパの制約の式



■ 関節にバネダンパー

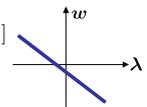
$$\lambda_6 = -K(q_6[t] + w_6[t+1]\Delta t) - Bw_6[t+1]$$

■ 並進のバネダンパー

$$\lambda_1 = -K(q_1 + w_1[t+1]\Delta t) - Bw_1[t+1]$$

$$w_1[t+1] = (\lambda_1 + Kq_1)/(K\Delta t + B)$$

LCPに組み込むことができる

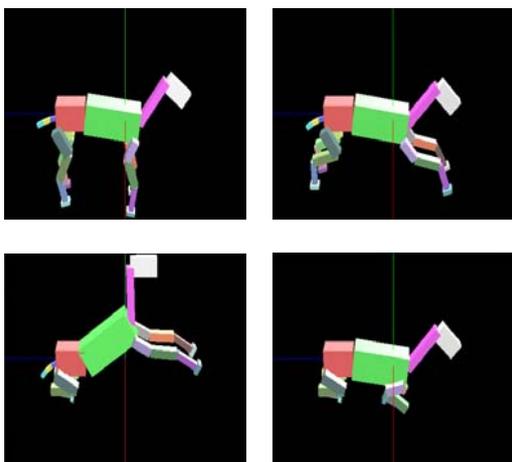


上式のように等式で表すことができるので, バネダンパが出す力を運動方程式と連立さ

せて解くことが出来る。

4. 2 四足ロボットモデルのシミュレーション

23 個の剛体と 14 個の球関節, 8 個の蝶番関節を組み合わせて下図のような馬型の 4 足ロボットを作り, 各関節の関節角を陰積分による PD コントローラによって制御し, 動作をシミュレーションした. その結果, 陽積分による PD コントローラでは安定にシミュレーションすることができないシミュレーションの時間刻み $\Delta t=50\text{ms}$ とした場合でも, 安定にシミュレーションを行うことができた.



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

[1] 長谷川晶一, バーチャルリアリティのためのモデリング, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 19 No. 4, pp. 26-33, 2007, 査読なし

[学会発表] (計 2 件)

[1] 松永昇悟, 長谷川 晶一, レオロジーモデルと SSD による大域的な塑性変形の表現, 情報処理学会「グラフィクスと CAD」研究会, 2008. 11. 8 福岡県 飯塚

[2] 時崎崇, 長谷川 晶一, 4 足多関節剛体モデルのシミュレーションによる起き上がり動作の生成, エンタテインメントコンピューティング 2008, 2008. 10. 30 石川県 金沢

[その他]

[1] ホームページ等

<http://springhead.info/> にてオープンソースソフトウェアとして研究成果を公開

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 晶一 (SHOICHI HASEGAWA)
電気通信大学・電気通信学部・准教授
研究者番号: 19700190