

汎用多リンク系動力学演算ライブラリ「Z-DYNAFORM」の開発

東京大学工学部 ○学 杉原知道 学 西脇光一 正 稲葉雅幸 正 井上博允

Development of “Z-DYNAFORM” — library for dynamics analysis of rigid multibody

Univ. of Tokyo ○ T.Sugihara, K.Nishiwaki, M.Inaba, H.Inoue

Abstract : We've developed a library for multibody dynamics analysis named "Z-DYNAFORM", which is helpful for analysing dynamic motions of multi-link type robots. "Z-DYNAFORM" can be applied for robots that will attach to the environment with any link on them – legged robots for example. The feature, software-structure, and algorithm for dynamics calculation of it will be discussed.

Keywords : Multibody dynamics, Dynamics calculation library, Legged locomotion, Humanoid

1 はじめに

リアルワールドにおける脚型ロボット、とりわけ二脚型ロボットのダイナミックな動作生成は、厳しい力学的拘束条件の下でその実現可能性を論じなければならず、そのためにも精密な動力学解析は不可欠である。

一般的にその動力学解析には市販のシミュレータを用いることが多いが、それらの主な用途は生成した動作の検証であり、大規模な計算時間と計算機リソースを必要とするなどの問題がある。実ロボット制御時に求められるのは、オブザーバとして利用可能な軽量の演算エンジンであると考えられる。

そのような背景のもと、ロボットの動作生成に有用なツールとなる汎用多リンク系動力学演算ライブラリを開発した。作成したライブラリを「Z-DYNAFORM, DYNAmics Analyser FOr Rigid Multibody」と名付ける（“Z”は開発者の名前の頭文字である）。

本報告では、この「Z-DYNAFORM」の特徴とソフトウェア構成、及び用いた演算手法について説明する。

2 汎用動力学ライブラリの設計方針

脚型ロボットのような多リンク系は、工業用マニピュレータとは異なり、基底リンク（全てのリンクの親リンク）ではなく足先など末端のリンクで空間に固定され、しかもそのような固定リンクが動作に伴って推移していく。そこで開発にあたっては、i) 多リンク系を任意のリンクで空間に固定することを可能にし、ii) 実ロボットの駆動と平行した演算も可能なようにリソースの消費を極力抑え iii) 動作生成に必要な物理量を高速且つ正確に算出することを目指した。

これまでに提案された多リンク系動力学演算のための手法の多くは、基底リンクが床などに固定されている系を前提とするものである。また空間に固定されない系の動力学演算法として提案されているものもあるが^[1]^[2]、それらは生成した動作の検証のためのシミュレーション手法としての意味合いが強い。

3 「Z-DYNAFORM」のソフトウェア構成

ライブラリは、保守性確保のために図1のような3層型の構成とした。開発言語はC言語である。開発OSはLinuxだが、プラットフォームには依存せずWindowsなど他のOSでもコンパイル可能である。

各モジュールと、その主な役割を説明する。

misc 全てのモジュールで共用されるエラー処理、文字列処理、乱数処理、リスト処理などを行う関数群。

vector 空間ベクトルや座標変換行列、ポリゴンデータなど3Dオブジェクトを扱うためのモジュール。

math 多次元ベクトル、行列とそれらを用いた数値計算用の関数群を実装したモジュール。

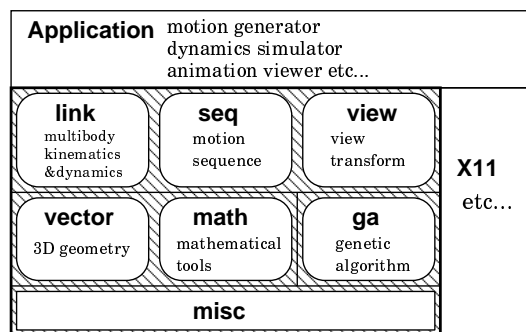


図1: “Z-DYNAFORM”の構成

ga(optional) 動作生成へのGAの応用を見越して用意したモジュール。

link 多リンク系(ロボット)を記述するための構造体を定義したモジュール。リンクモデルは、単一の外部ファイルにより完全に記述することが出来る。

seq ロボット動作シーケンス記述及びその入出力のためのモジュール。

view ロボットの挙動を視覚的に確認するための、投影変換演算モジュール(X11などのグラフィックスライブラリと組み合わせて用いる)。

これらは各々より下層にあるモジュールのみに依存し、同じ層にあるモジュール同士は全く独立している。

4 多リンク系逆動力学演算アルゴリズム

linkモジュールで用いた逆動力学演算方法について説明する。

まず、座標系を次の3つに分類する。

local系 各リンク毎に設定されたローカル座標系

total系 基底リンクから見た座標系

world系 絶対座標系

座標変換には同次行列を用いる。world系を Σ_w 、total系を Σ_0 、リンク i のlocal系を Σ_i とし、 Σ_j から Σ_i への変換を行列 ${}^i T_j$ で表す。

逆動力学演算はNewton-Euler法に従う。まず各リンクの角速度、角加速度、重心加速度を、基底リンクから末端リンクへと辿って求める順方向計算を行った後に、各関節に働く力及びモーメントを末端から基底へと辿って求める逆方向計算を行う。

順方向計算の基本となるのは次の式である。

$${}^i \omega_j = {}^i \omega_{j-1} + {}^i R_{j-1} {}^{j-1} \omega_j \quad (1)$$

$$\begin{aligned} {}^i\dot{\omega}_j &= {}^i\dot{\omega}_{j-1} + {}^iR_{j-1}{}^{j-1}\dot{\omega}_j \\ &+ {}^i\omega_{j-1} \times {}^iR_{j-1}{}^{j-1}\omega_j \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} {}^i\dot{p}_j &= {}^i\dot{p}_{j-1} + {}^iR_{j-1}{}^{j-1}\dot{p}_j \\ &+ {}^i\omega_{j-1} \times {}^iR_{j-1}{}^{j-1}p_j \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} {}^i\ddot{p}_j &= {}^i\ddot{p}_{j-1} + {}^iR_{j-1}{}^{j-1}\ddot{p}_j + 2{}^i\omega_{j-1} \times {}^iR_{j-1}{}^{j-1}\dot{p}_j \\ &+ {}^i\dot{\omega}_{j-1} \times {}^iR_{j-1}{}^{j-1}p_j \\ &+ {}^i\omega_{j-1} \times ({}^i\omega_{j-1} \times {}^iR_{j-1}{}^{j-1}p_j) \end{aligned} \quad (4)$$

但し、

${}^iR_j: \Sigma_j$ から Σ_i への姿勢変換行列
 ${}^i\omega_j: \Sigma_i$ からみた Σ_j の角速度ベクトル
 ${}^i p_j: \Sigma_i$ からみた Σ_j 原点の位置ベクトル

基底リンクが空間に固定されていない系では、式(1)~(4)だけから全リンクの world 系での挙動を調べることは難しいが、歩行における支持足のように world 系に固定されるリンクが既知であれば、そこから逆に基底リンクの world 系での運動を求めることが可能である。即ち、空間にリンク n で固定されているとすると、

$${}^wT_0 = {}^wT_n({}^0T_n)^{-1} \quad (5)$$

$${}^w\omega_0 = -{}^wR_0{}^0\omega_n \quad (6)$$

$${}^w\dot{\omega}_0 = -{}^wR_0{}^0\dot{\omega}_n - {}^w\omega_0 \times {}^wR_0{}^0\omega_n \quad (7)$$

$${}^w\dot{p}_0 = -{}^wR_0{}^0\dot{p}_n - {}^w\omega_0 \times {}^wR_0{}^0p_n \quad (8)$$

$$\begin{aligned} {}^w\ddot{p}_0 &= \mathbf{g} - {}^wR_0{}^0\ddot{p}_n - 2{}^w\omega_0 \times {}^wR_0{}^0\dot{p}_n \\ &- {}^w\dot{\omega}_0 \times {}^wR_0{}^0p_n \\ &- {}^w\omega_0 \times ({}^w\omega_0 \times {}^wR_0{}^0p_n) \end{aligned} \quad (9)$$

但し、 \mathbf{g} は重力加速度である。

順方向計算の手順をまとめる。

1. 固定リンク local 系から world 系への変換行列 wT_n を記憶。
2. 式(1)~(4)で $i=0$ とし、全自由度の関節角、関節角速度及び角加速度から total 系における各リンクの運動(並進速度、並進加速度、角速度、角加速度)を求める。
3. total 系から見た固定リンクの運動、先に記憶していた wT_n 、及び式(5)~(9)から、姿勢更新後の world 系における基底リンクの運動を求める。
4. 再度式(1)~(4)を利用。 $i=w$ として world 系における全リンクの運動を求める。

こうして求めた全リンクの world 系での運動から、Newton-Euler の運動方程式を用いて各関節に働く力、モーメントを計算する。これが逆方向計算である。

5 「Z-DYNAFORM」の応用

「Z-DYNAFORM」を用いて、ヒューマノイド H6^[3] のモデルを作成し、約 2 秒の動作を行わせたときの全身重心の運動、及び脚ロボットにとって重要な物理量である ZMP を観測した。ZMP の算出には、逆動力学演算を用いて高速に計算する方法を用いた^[4]。解析に要した時間は約 0.18 秒であった。このときの計算環境及び条件を表 1 に示す。

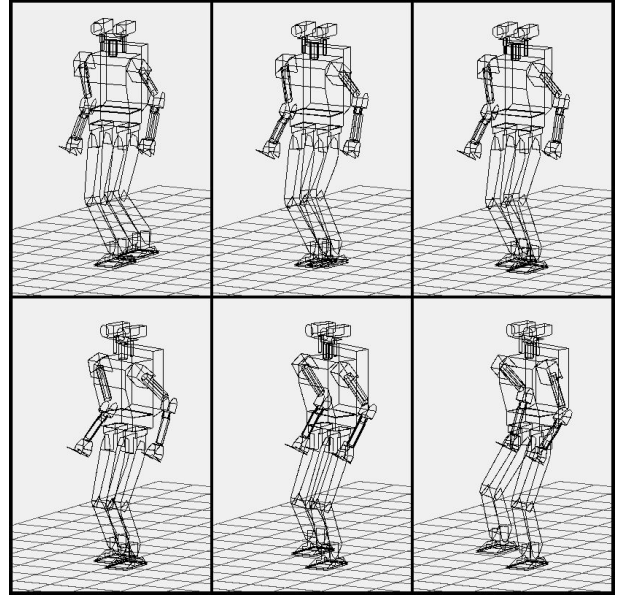


図 2: 支持脚切り替え動作のスナップショット

CPU	Intel Celeron300A
メモリ	192[MB]
OS	Linux ver2.2.14
時間刻み幅	10[msec]
リンク数	34

表 1: 計算試験環境

図 2 は、簡易アニメーションビューアによるこの動作のスナップショットである。固定リンク(支持足)が右足から左足に正しく推移していることが分かる。

また「Z-DYNAFORM」を用いて H6 の歩行動作などを生成した^[5]。

6 結論

任意のリンクで空間に固定される多リンク系を扱える動力学演算ライブラリ「Z-DYNAFORM」を開発した。今後はこのライブラリを利用し、実世界における二脚型ロボットのロバストな実時間動作生成アルゴリズムの開発を進める予定である。

なお、本研究の環境は、日本学術振興会未来開拓推進事業 JSPS-RFTF96P00801 の補助を受けた。

参考文献

- [1] 藤本康孝, 河村篤男. 床との衝突及び摩擦を考慮した 2 足歩行ロボットの三次元運動シミュレーション. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 857-863, 1997.
- [2] 山根克, 中村仁彦, 永嶋史朗. 構造可変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. 1000-1007, 1998.
- [3] 西脇光一, 杉原知道, 加賀美聡, 金広文男, 稲葉雅幸, 井上博允. 全身行動型ヒューマノイド「H6」の開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演会論文集, pp. 2P2-79-110, 2000.
- [4] 長阪憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允. 最速勾配法を用いた人間型ロボットの動歩行パターン生成. ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演会論文集, pp. 2P1-78-110, 1999.
- [5] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允. ZMP 導出の線形・非干渉化、離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道的高速生成 — 感覚行動統合全身型ヒューマノイド H6 での実現 —. 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2000.