

O(logN) 並列順動力学計算法とそのヒューマノイドシミュレータへの応用

○山根 克 (東大) 中村 仁彦 (東大)

O(logN) Parallel Forward Dynamics Computation — Application to Humanoid Simulator —

*Katsu Yamane (Univ. of Tokyo), Yoshihiko Nakamura (Univ. of Tokyo)

Abstract— This paper presents a new parallel forward dynamics algorithm based on the principle of virtual work. The algorithm achieves $O(N)$ complexity with serial computation and $O(\log N)$ time complexity with parallel computation on $O(N)$ processors. The computation time is reduced down to 1/3 of that of the previous method with $O(N^3)$ complexity for a human figure with 30-40 degrees of freedom, even with serial computation. The algorithm is also implemented as a computational engine of the humanoid simulator *OpenHRP*. The outline of the algorithm, effects of parallel computation, and its performance as a humanoid simulator, are shown.

Key Words: Dynamics Simulation, Parallel Computation, $O(\log N)$ Complexity, Humanoid Simulator

1. はじめに

近年、人間に近い構造を持ったヒューマノイドの開発が盛んに行われるようになってきたのに伴い、機構や制御アルゴリズムを実機に実装する前に検証するためのシミュレータの必要性が高まっている。筆者ら¹⁾はヒューマンフィギュアの順動力学計算を目的とした高速計算法を開発してヒューマノイドのシミュレータに応用し²⁾、従来の機構解析ソフトウェアより高速な動力学シミュレーションを可能にした。しかし、この計算法は系全体の自由度数を N としたときの計算量が $O(N^3)$ であり、多数のヒューマンフィギュアが複雑に干渉する系では計算量が膨大になってしまう。

本研究では、筆者ら³⁾が最近開発した順動力学計算法を並列化し、これをヒューマノイドのシミュレータに応用する。この計算法は、リンク数を N としたとき全体の計算量が $O(N)$ であり、30-40 自由度程度のヒューマンフィギュアの場合計算時間はシリアル計算時でも従来法¹⁾の約 1/3 となった。さらに、 $O(N)$ 個のプロセッサによる並列計算で計算時間は $O(\log N)$ となる。同様の計算複雑性を持った方法として⁴⁾などがあるが、本研究で提案する方法は以下のような特徴を持つ。

- ・ 閉リンク機構にも適用できる
- ・ 追加の計算なしに全関節の拘束力が得られる
- ・ 任意のプロセス数に最適なスケジューリングが可能

本稿では計算法の概要と並列計算の効果の評価、ヒューマノイドのシミュレータに実装した結果を示す。

2. 計算法

2.1 概要

本計算法は以下の手順からなる (Fig.1)。

1. 組立：関節による拘束がなく全リンクが独立な状態から、関節を 1 個ずつ追加し、新しい関節における拘束力とまだ追加されていない関節の加速度を仮想仕事の原理に基づき計算する⁵⁾。この時点で計算される拘束力と加速度は実際のリンク系における値ではないことに注意されたい。

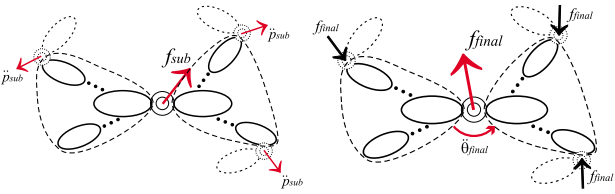


Fig.1 Assembly (left) and disassembly (right) phases

2. 分解：手順 1. とは逆の順序で関節を切断しながら、実際のリンク系における切断関節の拘束力と関節加速度を決定していく。

2.2 2 リンク系の例

Fig.2 のような関節 i とリンク p_i, c_i からなる 2 リンク系を例に具体的な計算法を示す。

まず運動学的な関係を考える。リンク p_i, c_i に固定された座標系の並進・角速度をまとめたベクトルをそれぞれ $\dot{r}_{p_i}, \dot{r}_{c_i}$ とする。また、関節 i の位置でのリンク p_i, c_i の速度をそれぞれ $\dot{r}_{i,p_i}, \dot{r}_{i,c_i}$ とし、関節 i の拘束条件が行列 K_{Ci} を用いて

$$K_{Ci}(\dot{r}_{i,c_i} - \dot{r}_{i,p_i}) = 0 \quad (1)$$

と表されているものとする。ここでは簡単のため K_C が時間変化しない、すなわちホロノミックな拘束を考えるが、これが時間変化する場合への拡張は容易である。同様に関節 i の関節速度 $\dot{q}_i$ が行列 K_{Ji} を用いて

$$\dot{q}_i = K_{Ji}(\dot{r}_{i,c_i} - \dot{r}_{i,p_i}) \quad (2)$$

となるものとする。 $\dot{r}_{c_i}, \dot{r}_{p_i}$ と $\dot{r}_{i,c_i}, \dot{r}_{i,p_i}$ の関係はヤコビアン J_{i,c_i}, J_{i,p_i} を用いて以下のように表される。

$$\dot{r}_{i,k} = J_{i,k} \dot{r}_k \quad (k = c_i, p_i) \quad (3)$$

次に運動方程式を考える。各リンクの原点周りの慣性行列を M_k 、重力・速度依存項を c_k 、作用する一般化力を $\tau_k, (k = c_i, p_i)$ とすると、運動方程式は以下のようなになる。

$$M_{c_i} \ddot{r}_{c_i} + c_{c_i} = \tau_{Gc_i} \quad (k = c_i, p_i) \quad (4)$$

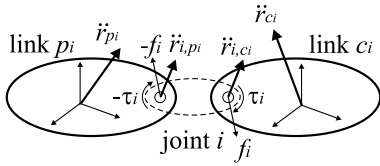


Fig.2 Two-link example

r_{p_i}, r_{c_i} をこの系の一般化座標と考えると、6 自由度のリンク系 2 つが関節 i で拘束された閉リンク機構とみなせる。このとき、拘束力 f_i 、関節トルク τ_i と一般化力の関係は仮想仕事の原理より次のようになる⁵⁾。

$$\tau_{Gc_i} = H_{i,c_i}^T f_i + H_{Ji,c_i}^T \tau_i \quad (5)$$

$$\tau_{Gp_i} = -H_{i,p_i}^T f_i - H_{Ji,p_i}^T \tau_i \quad (6)$$

ここで $H_{i,k} \triangleq K_{Ci} J_{i,k}$, $H_{Ji,k} \triangleq K_{Ji} J_{i,k}$ ($k = c_i, p_i$) である。

式 (1), (3) を時間微分した式と 式 (4)–(6) を解くと拘束力 f_i が次式のように求まる。

$$f_i = S_{ii}^{-1} (-S_{Jii} \tau_i + H_{i,c_i} M_{c_i}^{-1} c_{c_i} - H_{i,p_i} M_{p_i}^{-1} c_{p_i})$$

$$S_{ii} \triangleq H_{i,p_i} M_{p_i}^{-1} H_{i,p_i}^T + H_{i,c_i} M_{c_i}^{-1} H_{i,c_i}^T$$

$$S_{Jii} \triangleq H_{i,p_i} M_{p_i}^{-1} H_{Ji,p_i}^T + H_{i,c_i} M_{c_i}^{-1} H_{Ji,c_i}^T$$

さらにこれを用いて関節加速度 $\ddot{q}_i$ を計算する。

以上の計算法を拡張すると、任意の 2 つのリンク系を接続する計算手順が導出できる。

2.3 並列計算

並列計算時の計算手順は以下のようになる。

1. 全リンクをプロセス数個のグループに分割する
2. 各グループ内でリンクを接続する計算を並列に行う
3. 手順 2. でできたグループどうしを接続する計算を可能ならば並列に行い、リンク系を完成させる

このように本計算法は高い並列性を持っており、プロセス数に応じて最適なスケジューリングが可能である。

3. 計算時間の評価

Fig.3 に 8–32 リンクのシリアル機構の順動力学計算を行うために必要な計算時間を示す。計測に用いた CPU は Alpha 21264 500MHz であり、クラスターの各ノードは Myrinet で接続されている。並列計算ライブラリには Myricom 社より配布されている MPICH over GM を用いた。通信によるオーバーヘッドはかなり大きいものの、最大限のプロセスを使うと計算時間の増加が抑えられる傾向が現れている。Table 1 は 34/48 自由度のヒューマンフィギュアの順動力学計算を 1–4 プロセスの並列計算で行った場合の計算時間である。4 プロセスの場合は各プロセスにリンクを均等に割り当てるのが難しく、並列計算の効果は小さくなっている。

本計算法をヒューマノイドシミュレータ OpenHRP²⁾ の計算エンジンとして実装した。34 自由度のヒューマンフィギュアの 2 秒間の運動をサンプリングタイム 2[ms]、シリアル計算でシミュレートするのに要する時

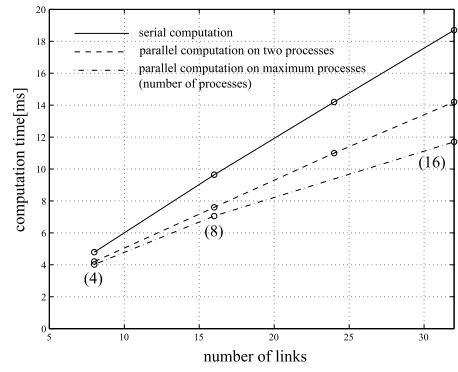


Fig.3 Computation time of serial chains

Table 1 Computation time of human figures [ms]

DOF	34	48
single process	10.8	15.1
2 processes	8.50	10.9
4 processes	7.84	9.68

間は PentiumIII 1GHz を搭載した PC で約 6.8 秒であった (干渉チェック、表示を除く)。なお、従来の計算法¹⁾では同じ計算に約 17 秒を要する。

4. おわりに

リンク数を N としたとき、 $O(N)$ 個のプロセスで $O(\log N)$ の計算時間で順動力学計算を行うことのできる計算法を開発し、ヒューマノイドシミュレータの計算エンジンとして応用した。並列計算の効果調べた結果、計算時間短縮は実現されたものの、多数のプロセスを使うと通信のオーバーヘッドが相対的に大きくなり、並列計算の効果は小さくなった。通信方式の最適化、遅延の小さい並列計算ライブラリの導入などが今後の課題である。

本研究は (財) 製造科学技術センターからの受託研究「人間協調・共存型ロボットシステムの研究開発」の一環として行われた。また第一著者は日本学術振興会の特別研究員である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 中村, 比留川, 山根ほか: “仮想ロボットプラットホーム,” 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.28–36, 2001.
- 3) K. Yamane and Y. Nakamura: “ $O(N)$ Forward Dynamics Computation of Open Kinematic Chains Based on the Principle of Virtual Work,” In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2824–2831, 2001.
- 4) R. Featherstone: “A Divide-and-Conquer Articulated-Body Algorithm for Parallel $O(\log(n))$ Calculation of Rigid-Body Dynamics,” *International Journal of Robotics Research*, vol.18, no.9, pp.867–892, 1999.
- 5) Y. Nakamura and M. Ghodoussi: “Dynamics Computation of Closed-Link Robot Mechanisms with Nonredundant and Redundant Actuators,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.5, no.3, pp.294–302, 1989.