

# 一般的な構造可変リンク系の運動計算

## — ヒューマノイドのシミュレーションへの応用 —

○ 山根 克 中村 仁彦 (東京大学大学院工学系研究科 機械情報工学専攻)

### Dynamics Computation of General Structure-Varying Kinematic Chains

#### — Application to Simulation of Humanoid Robots —

\*Katsu YAMANE, Dept. of Mechano-Informatics, Univ. of Tokyo

Yoshihiko NAKAMURA, Dept. of Mechano-Informatics, Univ. of Tokyo

**Abstract**—The objective of this research is to develop a computational foundation for dynamics simulation of humanoid robots. In this paper, we propose a method for computing the velocity boundary condition, which is required when incontinuous change of joint velocities occurs on structure changing. Some examples of simulating the motions of human figures are also presented.

**Key Words**—structure-varying kinematic chain, humanoid robots, dynamics simulation

## 1 はじめに

ヒューマノイドロボットの研究は、要素技術開発の段階からそれらを総合する段階に入りつつある。それに伴い、開発中の制御アルゴリズムをコストの高い実機ではなく計算機上で試験するためのシミュレーション技術への要求が高まっている。しかし、ヒューマノイドロボットの運動はロボットマニピュレータの運動とは全く異なる性質を持ち、既存の計算アルゴリズムやソフトウェアで対応するのは困難である。ヒューマノイドロボットの運動の特徴として、Fig.1のようにリンク構造が時々刻々変化すること、閉リンク機構を含む多自由度のリンク機構であることが挙げられる。

リンク構造の変化する系のシミュレーションシステム構築を目指した研究としては、宇宙ロボットを対象にしたもの [1] がある。筆者ら [2] はすでに、一般的な閉リンク機構に適用可能な効率的逆動力学計算法と、構造変化を容易に処理することのできるリンク機構表現法を提案し、結合/切断条件をあらかじめ与えておくだけで構造可変リンク系の運動計算を高速に行うことができることを示した。本論文では、リンク結合時の速度境界条件の計算法を示し、これと文献 [2] の処理法により構造変化を伴う動力学シミュレーションを行った例を示す。

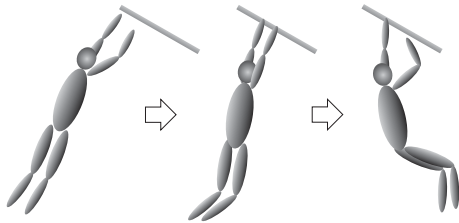


Fig.1: Example of structure changing

## 2 構造変化後の速度境界条件

リンクとリンクが結合する直前において2つのリンクの相対速度が0でない場合には衝突現象が起こり、構造変化の前後で関節速度が不連続に変化するため、動作解析の数値積分では構造変化直後の速度を境界条件として与えることが必要である。このような状況はヒューマ

ノイドの歩行や手を伸ばして物をつかむ場合などにおいてしばしば生じる。以下では、一般の接触・衝突現象に関する研究 [3] を応用し、衝突した2つの剛体が関節で接続される場合の速度境界条件の計算法を示す。

結合する2つのリンクがそれぞれリンク機構1, 2に属しているとする。結合前の各々の一般化座標を  $\theta_i (i = 1, 2)$ 、結合点  $r$  の一般化座標  $\theta_i$  に関するヤコビアンを  $J_i = \partial r / \partial \theta_i$ 、両機構の慣性行列を  $A_i$  とする。

それぞれのリンク機構に結合点において力積  $F_i$  が加わり、構造変化の前後で一般化座標の速度が  $\Delta \dot{\theta}_i$  だけ変化したとする。2つのリンクが結合していることを示すために、実際には存在しない仮想リンクが Fig.2のように生成される [2]。結合点に  $p$  自由度の新しい関節  $\theta_n \in \mathbb{R}^p$  ができたとし、結合により生成された仮想リンクの  $\theta_n$  に関するヤコビアンを  $J_n$  とする。

力積と運動量変化の関係から

$$A_i \Delta \dot{\theta}_i = -J_i^T F_i \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

が成り立つ。また、作用反作用の法則から

$$F_2 = -F_1 \quad (2)$$

仮想リンクとその実体リンクの速度は一致するから、結合後の機構の関節速度について以下の関係が成り立つ。

$$J_1 (\dot{\theta}_1 + \Delta \dot{\theta}_1) = J_2 (\dot{\theta}_2 + \Delta \dot{\theta}_2) + J_n \dot{\theta}_n \quad (3)$$

結合により機構が受ける力積は、新しい関節  $\theta_n$  の可動方向成分を持たない。例えば、新しく回転関節が生成される場合には、その軸回りのモーメントを与えることはできない。この条件は以下のように表される。

$$J_n^T F_1 = 0 \quad (4)$$

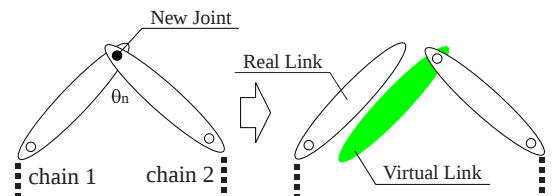


Fig.2: Virtual link for connection

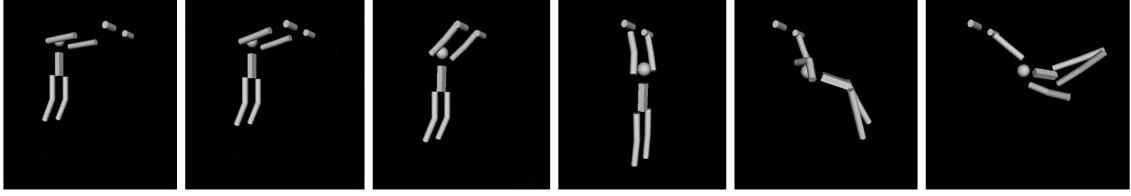


Fig.3: Example of dynamics simulation of human figure: high bar

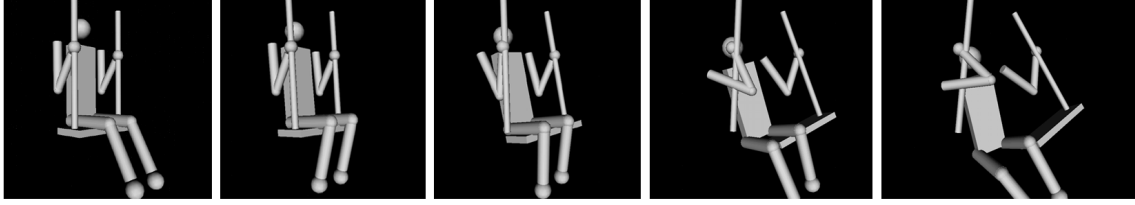


Fig.4: Example of dynamics simulation of human figure: swing

式(1)–(4)を $\Delta\dot{\theta}_1, \Delta\dot{\theta}_2$ について解くと、一般化座標の速度の変化が計算される。

$$\Delta\dot{\theta}_1 = -A_1^{-1}J_1^T B^{-1}(E_6 - C)v \quad (5)$$

$$\Delta\dot{\theta}_2 = A_2^{-1}J_2^T B^{-1}(E_6 - C)v \quad (6)$$

ただし、

$$B = J_1 A_1^{-1} J_1^T + J_2 A_2^{-1} J_2^T \quad (7)$$

$$C = J_n (J_n^T B^{-1} J_n)^{-1} J_n^T B^{-1} \quad (8)$$

$$v = J_1 \dot{\theta}_1 - J_2 \dot{\theta}_2 \quad (9)$$

であり、 $E_6$ は6行6列の単位行列である。

なお、結合した2つのリンクが固定される場合、すなわち $p = 0$ の場合は、式(3)に $\dot{\theta}_n$ は現れず、式(4)は不要になる。そのときの解は式(5)、(6)において $C = O$ としたものとなる。

1つの機構の中でリンクの結合が発生する場合には、一般化座標 $\theta_1$ と $\theta_2$ 、慣性行列 $A_1$ と $A_2$ はそれぞれ一致するが、ヤコビアン $J_1$ と $J_2$ は異なる。また、式(1)の代わりに次式を用いる。

$$A_1 \Delta\dot{\theta}_1 = -J_1^T F_1 - J_2^T F_2 \quad (10)$$

同様に速度の変化を求めると以下ようになる。

$$\Delta\dot{\theta}_1 = -A_1^{-1}J_1^T \tilde{B}^{-1}(E_6 - \tilde{C})\tilde{v} \quad (11)$$

ただし、

$$\tilde{B} = (J_1 - J_2)A_1^{-1}(J_1 - J_2)^T \quad (12)$$

$$\tilde{C} = J_n (J_n^T \tilde{B}^{-1} J_n)^{-1} J_n^T \tilde{B}^{-1} \quad (13)$$

$$\tilde{v} = (J_1 - J_2)\dot{\theta}_1 \quad (14)$$

である。

### 3 構造変化を伴う運動の解析例

文献[2]の計算法および前節の速度境界条件計算法を用いて力学シミュレーションを行った。いずれも関節角を一定範囲に制限する以外の制御は行っていない。

#### 3.1 鉄棒

リンクの結合の例として、飛んできた人間が片手で鉄棒をつかむ様子を Fig.3に示す。ヒューマンフィギュアのリンク構造は腕・脚にそれぞれ4自由度を持つ16自由度系とし、結合により鉄棒と両手の間には3自由度の球面関節が生成される。

#### 3.2 ブランコ

Fig.4はブランコが壊れてヒューマンフィギュアが落下する様子をシミュレーションしたものである。モデルは鉄棒の場合と同じ16自由度系で、ブランコは左右の棒が上部に3自由度の球面関節を持っている。また、両手と左右の棒の間には3自由度の球面関節、両太ももとブランコの板の間に横方向の並進関節があり、合計30自由度系となっている。初めに板が左の棒からはずれ、その後両太ももが板から滑り落ちる。

### 4 おわりに

本論文ではリンク結合時の速度境界条件の計算方法を示し、構造変化を伴うヒューマンフィギュアの動力学シミュレーションを行った。今後は足の接地モデルを導入し、歩行など地面との干渉が発生する運動にも適用可能なシミュレーションシステムを開発する予定である。

### 参考文献

- [1] 高橋, 松永, 狼. 形態変化ロボットシステムのための汎用動力学プログラム. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 2BI1-6, 1998.
- [2] 山根, 中村, 永嶋. 構造可変な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. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 1BI2-4, 1998.
- [3] F. Pfeiffer and C. Glocker. *Multibody Dynamics with Unilateral Contacts*. Wiley series in nonlinear science, 1996.