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

Dynamics Computation of Structure-Varying Mechanisms and Its Application to Human Figures

山根 克 (東大) 正 中村 仁彦 (東大) 正 永嶋 史朗 (富士通研)

Katsu YAMANE, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, 113-0033 Tokyo Yoshihiko NAKAMURA, University of Tokyo

Fumio NAGASHIMA, Fujitsu Laboratories Ltd., 4-1-1 Kamikodanaka, Nakahara-ku, 211-8588 Kawasaki

Abstract— In dynamics computation of human figures, we should consider the changability of link structure, which is the outstanding feature of systems with living creatures. This paper deals with the dynamics computation method for structure-varying systems, along with the inverse dynamics algorithm for general closed-link structure, the method of describing link structure, and the concept of pseudo-closed-link structure, which act important roles in our algorithm. The results of dynamics simulation are also presented to show the ability of our algorithm. **Key Words**— Structure-varying system, Human figure, Dynamics simulation, Closed-link structure.

1 はじめに

ヒューマノイドの研究に不可欠なツールとして,運動 の力学的なシミュレーションを行うソフトウェアの開発が 期待されている.ロボットマニピュレータの機構解析や動 力学シミュレーションに対しては,従来から様々なソフト ウェアが提供されてきた.しかし,ヒューマノイドの研究 が対象とする運動や機構は,従来のソフトウェアでは対応 しにくい性質を持つ.

ロボットマニピュレータと比較すると、生物を含む力学 系の最大の特徴は構造可変性にあるといえる、物をつか む、歩くなどの運動ではリンク構造が時々刻々変化してい く、従来のソフトウェアでは、構造の定義はオフラインで 行う必要があり、連続的にシミュレーションを行うことは できない、また、人間1人でも40以上の自由度を持つこ とからもわかるように、非常に大きな自由度を持った力学 系を扱う必要があり、計算の効率化も要求される。

本研究では構造変化を自動的な操作のみで取り扱うこと ができ,計算効率の高いヒューマン・フィギュア用動力学 シミュレーションシステムの開発を目標とする.本論文で は,一般的な閉リンク機構の動力学計算法,リンク機構の 表現法,そして構造変化の取り扱い方について新たな手法 を提案し,いくつかの実例によってその有効性を示す.

2 一般的な閉リンク機構の動力学

閉リンク機構の動力学計算では閉ループによる拘束を考 慮するため,開リンク機構より多くの計算を必要とする.

現在広く利用されている汎用的な動力学解析ソフトウェ アでは、全リンクの位置・姿勢を一般化座標にとり、これ と関節などに応じた拘束条件を組み合わせて運動方程式を 求めている[1].このような方法は汎用性が高い反面,扱う 変数が非常に多く膨大な計算量が必要で,複雑な機構の解

析には長い時間がかかる.

より効率的な動力学計算法として,パラレルメカニズム に対して駆動関節の一般化座標に関するヤコビアンを用い る方法がある[2].一般化座標の数は自由度数ですむため効 率的に計算できるが,機構の特殊性に頼る部分があり,一 般的な閉リンク機構に適用するのは困難であった.本研究 では,効率的な動力学計算法を一般の閉リンク機構に適用 するために,アルゴリズムの改良を行った.

2.1 パラレルメカニズムの逆動力学^[2]

閉リンク機構をいくつかの関節で仮想的に切断した仮想 開リンク機構を考える.この開リンク機構のすべての関節 θ_O が駆動されていると仮定して,実際の閉リンク機構に 要求されたのと全く同じ運動を行わせるのに必要な駆動ト ルク τ_O を計算する.このとき開リンク機構の効率的な逆 動力学計算法を適用することができる.

 au_O を,以下の2式により駆動関節 $heta_A$ の駆動トルク au_A に変換する.

$$\boldsymbol{\tau}_G = \boldsymbol{W}^T \boldsymbol{\tau}_O \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\tau}_G = \boldsymbol{S}^T \boldsymbol{\tau}_A \tag{2}$$

ここで

$$\boldsymbol{W} = \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_O}{\partial \boldsymbol{\theta}_G} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{S} = \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_A}{\partial \boldsymbol{\theta}_C} \tag{4}$$

であり, θ_G は閉リンク機構の状態を表す一般化座標, τ_G はそれに対応する一般化力である.

ここで現れる2つのヤコビアン W,S の計算法は,平面 機構やパラレルメカニズムについては知られていたが,一 般的な方法がなく,この計算法を一般の機構に適用するこ とができなかった. 本研究では任意の閉リンク機構に適用可能なW,Sの計 算法を開発した.

閉ループを Fig.1 のように 1 つの関節で仮想的に切断す ることを考える.このとき,閉ループは 2 本のリンク列に 分けられる.切断点の速度が一致することから,次式を満 たす $J_{Li} \in \mathbf{R}^{6 \times N_J}$ が計算できる.

$$\boldsymbol{J}_{Li}\boldsymbol{\dot{\theta}}_J = \boldsymbol{O} \tag{5}$$

ここで N_J は全関節数, θ_J は全関節角である.式(5) は 閉ループの拘束を表す. J_{Li} の成分は,開リンク機構にお ける関節角に対する手先位置のヤコビアンと同様の手順で 計算できる.



Fig.1: Derivation of constraint equation of a closed loop

機構中のループ数を N_L として, $J_{Li}(i = 1, 2, ..., N_L)$ を縦に並べて $J_C \in \mathbf{R}^{6N_L \times N_J}$ を作る. J_C の $6N_L$ 個の行のうち独立なものがm個あるとし,それらを集めて $J_{Cm} \in \mathbf{R}^{m \times N_J}$ を作る. θ_J からm個の関節を選んで θ_S とし,残りの関節を θ_G として J_{Cm} をそれぞれの関節に対応する成分 $J_S \in \mathbf{R}^{m \times m}, J_G \in \mathbf{R}^{m \times (N_J - m)}$ に分ける. θ_S と θ_G の関係は

$$\boldsymbol{J}_S \boldsymbol{\theta}_S = -\boldsymbol{J}_G \boldsymbol{\theta}_G \tag{6}$$

となる . J_S は正方行列であり,これが正則になるように θ_S を選ぶ.このとき, θ_S は θ_G から一意に定められるの で, θ_G を一般化座標とすることができる.よって,機構 の自由度は

$$N_F = N_I - m \tag{7}$$

で与えられる.

式 (6) より, $\boldsymbol{\theta}_{S}$ の $\boldsymbol{\theta}_{G}$ に関するヤコビアン $\boldsymbol{H} \in \boldsymbol{R}^{m \times N_{F}}$ が次式で与えられる.

$$\boldsymbol{H} \stackrel{\triangle}{=} \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_S}{\partial \boldsymbol{\theta}_G} = -\boldsymbol{J}_S^{-1} \boldsymbol{J}_G \tag{8}$$

W, S は H から以下のように容易に構成できる.

- W: θ_O に含まれる関節のうち,
 - 一般化座標でない関節に対応する行: H の対応 する行
 - 一般化座標である関節に対応する行:対応する
 要素は1,それ以外は0

 S: θ_A に含まれる関節に対して, Wと同様の操作を 行う.

以上のように,開リンク機構のヤコビアンと同様に計算 できる J_C をもとに,機構全体の自由度やトルク変換ヤコ ビアンW, Sが一般の閉リンク機構に対して計算される. これにより, [2]の効率的な逆動力学計算アルゴリズムが 一般の閉リンク機構に適用できる.

3 構造可変リンク系

3.1 構造可変リンク系とは

構造可変リンク系とは、リンクとリンクが結合して新た な関節が生じたり、関節が切断されてリンクが分離したり するようなリンク系のことをいう、例えば、手で鉄棒をつ かむ運動では手と鉄棒の間に新しい関節が生じる.また2 足歩行においては、左右の足が地面との結合 / 分離を繰り 返していると考えることができる.本節では、構造可変性 を自動的に扱うための手法を提案する.

3.2 ポインタによる開リンク連鎖表現

本研究で採用した動力学計算アルゴリズムは,リンク 列をベースリンクからエンドリンクへ(順方向),および エンドリンクからベースリンクへ(逆方向)たどっていく 漸化式形式で表現されている.このような計算を効率的に 行うために,本研究ではC++によるプログラミングを考 慮し,開リンク連鎖を他のリンクへの矢印となる「ポイン タ」によって表現する.

まず,各リンクに対してベースリンク側につながって いる「親(Parent)リンク」を指定し,それを指す「親ポ インタ」を定める.次に,エンドリンク側につながってい るリンクを「子(Child)リンク」とし,それを指す「子ポ インタ」を定める.エンドリンク側につながっているリン クが複数ある場合には,そのうちの1つを「子リンク」と し,残りはその「兄弟(Brother)リンク」として,「兄弟 ポインタ」によって線形リスト状に追加していく.

順方向計算を行う関数では,自分に関する処理が終了し た後,Brother と Child に対して同じ関数を再帰的に呼 び出す.また,逆方向計算を行う関数では,Brother と Child に対して再帰呼び出しを行った後,自分に関する処 理を行う.Parent ポインタは,親リンクのデータを参照 するときに利用する.このように,ポインタによる機構表 現は漸化式形式で表現されたアルゴリズムを C++ でイン プリメントするのに適している.

3.3 仮想リンクによる閉リンク切断表現

閉リンク機構ではリンク列が閉じているため、リンク の親子関係が決められない.そこで、閉ループを仮想的に 切断して開リンク機構と同様に記述し、切断関節を持つ リンクを「実体(Real)リンク」とする「仮想(Virtual)リ ンク」を作って実体リンクのない側のエンドリンクとして 追加する(Fig.2).ただし,仮想リンクは運動学パラメー タのみを持ち,力学パラメータはすべて0とする.このと き,仮想リンクと実体リンクを対応付けるために,仮想リ ンクから実体リンクを指す「実体ポインタ」を導入する.



Fig.2: Describing closed loop by virtual link

以上"Parent", "Child", "Brother", "Real"の4種類の ポインタを定義することによって,閉リンク機構を含む任 意のリンク機構を,動力学計算に便利な形で記述すること ができる.閉リンク機構を記述した例を Fig.3 に示す.こ の方法の特徴をまとめると以下のようになる.

- リンクの接続関係が明確で、漸化式形式の動力学計算のインプリメントが容易である。
- 閉ループと仮想リンクが1対1に対応し,閉リンクの 判別が容易である.
- 動力学計算における仮想切断点は仮想リンクとその親 リンクとの間の関節となる.
- 閉リンク機構の表現は一意ではない.どのリンクを実体とする仮想リンクを考えるかが表現を決定する.



Fig.3: Example of describing link structure

3.4 仮想対偶による接地表現

リンクどうしの結合により閉リンク機構ができる場合 は,新たに仮想リンクを生成すればよい.しかし,Fig.4の ようにリンクの結合が発生しても開リンク機構のままで ある場合には, Fig.5に示すようにリンクの親子関係を逆転させる必要があり,その際隣合う関節間の関係を表す Denavit-Hartenberg Parameters や力学パラメータをオフラインで変更しなければならない.



Fig.4: Connection of links



Fig.5: Link structure before and after connection

そこで,もとのベースリンクと地面との間の自由関節を 仮想的な6自由度の対偶と考えることで閉リンク機構とみ なす.このような閉リンク機構を擬似閉リンク機構と呼ぶ ことにする. Fig.4に対する擬似閉リンク機構とそのリン ク構造を Fig.6 に示す.ここで, Parent ポインタに付記 した "*Rotate*", "*Free*" は関節の種類を表す.

地面との間の仮想対偶によって擬似閉リンク機構を考 え,構造変化を処理する手法は以下のような特徴を持つ.

- リンクの親子関係を逆転させる必要がない.
- リンク結合後の構造が開リンクであるか閉リンクであるかを問わず,同じ手順で処理することができる.
- 関節の切断¹は、仮想リンクとその親リンクとの間の
 関節、すなわちリンク結合により生じた関節または閉
 リンク機構において仮想切断点となる関節に限る.
- 結合後の構造が開リンクである場合は,開リンクとして計算した場合より計算量は多くなる.

¹動力学計算における仮想的切断ではなく,構造変化を起こす物理的な 切断をいう.



Fig.6: Pseudo-closed-link structure



Fig.7: Dynamics simulation of link connection: (1)-(3) before connection, (4)-(6) after connection

4 計算例

以上に述べたアルゴリズムを(株)富士通研究所で開発 された Firstsight のモジュールの1つとしてインプリメン トし,構造可変系の動力学を計算した例を示す.

4.1 リンクの結合

ベース固定の4関節平面シリアル機構の先端のリンクが 途中で地面に固定され,1自由度の閉リンク機構となる場 合をシミュレーションした様子を Fig.7 に示す.外部から 指定するのは先端リンクを固定する時刻のみで,固定に伴 う仮想リンクの生成により自動的に閉リンク機構の動力学 計算が行われている.



Fig.8: Human figure[3]

4.2 ヒューマンフィギュアの歩行

文献 [3] では,モーションキャプチャで得られた人間の 歩行運動のデータを利用し,地面と接触している方の足と 地面が結合するとして逆動力学計算を行い,歩行時の関節 トルクや足と地面との間に働く力を計算している.計算に 用いたモデルを Fig.8 に示す.

5 おわりに

本論文では, ヒューマンフィギュアの動力学シミュレー ションに必要な構造可変系の運動計算について述べた.ま ず, 閉リンク機構の逆動力学計算について, 従来の方法を 改良し, ヒューマンフィギュアを含む力学系に現れる複雑 な閉リンク機構に適用できるようにした.そして, リンク 機構を隣合うリンクへのポインタと仮想リンクによって表 現し, さらに擬似閉リンク機構を考えることであらゆる状 況における構造変化を統一的に扱うことができることを示 した.また, 簡単な例について動力学シミュレーションを 行い, ここで述べた手法の妥当性を示した.

なお,本研究は情報処理振興事業協会(IPA)の創造的ソ フトウェア育成事業「人間/生物を含むモーションコンテ ンツ制作支援環境の開発」の中で行われたものである.

参考文献

- Farid M.L. Amirouche. Computational Methods in Multibody Dynamics. Prentice - Hall, 1992.
- [2] 中村 仁彦. パラレルメカニズムの動力学. 日本ロボット学会 誌, 10(6):709-714, 1992.
- [3] 戸川晋一. ヒューマンフィギュアの力学的運動生成に関する 研究. 東京大学大学院工学系研究科 修士論文, 1998.