

並列的解法による劣駆動リンク系の逆動力学計算

Inverse Dynamics Calculation of Underactuated Link Systems Using Parallel Solution Scheme

○ 北村 悠人 (筑波大院) 山中 浩司 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Yuto Kitamura, Kouji Yamanaka (Graduate School, Univ. of Tsukuba) and Daigoro Isobe (Univ. of Tsukuba)

In this paper, the parallel solution scheme is applied to the calculation of inverse dynamics for underactuated link systems. This paper describes the process of a solution scheme of kinematics that is developed on the basis of the finite element method in order to calculate target trajectories that compensate for the inertial forces acting in the systems. The obtained trajectories are fed into the inverse dynamics calculation using the parallel solution scheme. Some numerical experiments are carried out on underactuated link systems and the validity of the parallel solution scheme is verified.

Key Words: Inverse dynamics, Underactuated link systems, Kinematics, Parallel solution scheme

1. はじめに

本研究で扱う劣駆動リンク系とは、システムの自由度に対してアクチュエータの数が少ないシステムで、アクチュエータにより直接制御できない関節が存在するリンク系のことである。劣駆動リンク系の利点として、系の軽量化・省電力化・アクチュエータが少なく済むことによるシステムの簡素化・耐故障性の向上およびコストダウンなどが挙げられる。そのため、宇宙空間など様々な分野での利用が期待されている。しかしながら、直接制御できない関節が存在するため、非ホロノミックなシステムとなり、制御は難しくなる[1][2]。

一方、連続体力学に基づく数値解析手法として広く用いられている有限要素法(FEM)は、一般的に絶対的な直交座標系に基づいて定式化され、系全体を微小要素に離散化し、それぞれの情報を全体方程式に集約して解を求めるといった手法である。この特徴を利用し、並列的に求められた節点力を力学的な関係に基づいて関節トルクに変換する並列的逆動力学計算法(以降、並列的解法と記す)が開発された[3]。本解法の節点力-トルク換算式では、節点力に関する成分、座標変換に関する成分、部材の長さに関する成分が個々のマトリックスに分割されて表現されるため、機構の変化に対しても入力データの変更により柔軟かつ簡便に対応することができる。また、柔軟リンク系や枝分かかれリンク系など、複雑なダイナミクスを有する系やロボット機構に対しても適用可能であることが確認されている[4-6]。

本研究では、劣駆動リンク系の逆動力学問題に焦点を当て、まず劣駆動リンク系の軌道を算出するためのアルゴリズムをFEMに基づき開発した。また、これにより得られた軌道を並列的解法による逆動力学計算に入力し、算出されたトルク曲線から並列的解法の妥当性を確認した。

2. 軌道更新アルゴリズム

並列的解法は、動的な効果を含めた節点力を求めれば全関節のトルクが算出されるため、その計算過程は部材剛性に依らず同一のものとなる。したがって、部材剛性や減衰を考慮した正確な軌道を作成し、それを並列的解法の入力とすれば良い。以下にFEMを用いた軌道計算アルゴリズムについて記す。系の移動によって生じる体積力を考慮すると、仮想仕事の原理より、時刻 $t+\Delta t$ における増分型運動方程式は次式で定式化される。

$$[M]\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + [M]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\}_t = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \quad (1)$$

ここで $[M]$ は全体質量マトリクス、 $[C]$ は全体減衰マトリクス、 $[K]$ は全体剛性マトリクス、 $\{F\}$ は外力ベクトル、 $\{R\}$ は内力ベクトル、 $\{u_m\}$ は系の移動量ベクトル、 $\{u_d\}$ は系の変形量ベクトルである。(1)式に時刻毎の $\{u_m\}$ を入力することで逐次的に $\{u_d\}$ が算出され、この2つの変位量の和として剛性や減衰を考慮した軌道が得られる。時間積分法としては、Newmarkの β 法 ($\delta=1/2, \beta=1/4$) を使用した。さらに本研究では、劣駆動関節を表現するために、(1)式の全体剛性マトリクス $[K]$ の軸方向以外の成分を 0 にすることとした。一方、劣駆動関節が系の中に存在すると、初期の入力軌道(剛体リンク系のもの)と出力軌道(劣駆動リンク系のもの)との間に大きな差異が生じてしまうため、正確な軌道が算出できない。その解決法として、入力軌道である剛体リンク系の軌道をステップ間で逐次更新することとした。本稿では、水平面内における2リンク系モデルを例として、この軌道更新アルゴリズムについて説明する(Fig.1参照)。まず、任意の時刻 t の入力軌道が分かっていると、この入力軌道を $[K]$ マトリクスの軸方向以外の成分を 0 とした(1)式に入力し、2リンク目に生じる変形量 $\{u_d\}_t$ を算出する。次に、リンク先端の変形量から劣駆動関節の変形角 θ_t を算出し、 k の変形角 θ_t を保持したまま、1リンク目の関節を剛体リンク系の入力軌道通りに ϕ_{t+1}

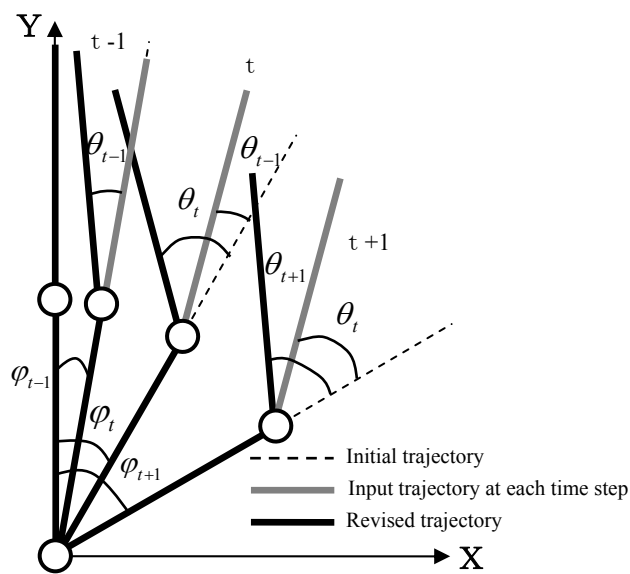


Fig. 1 Concept of successive trajectory revision algorithm for underactuated link systems

へ回転させることにより、時刻 $t+1$ における入力軌道を決定する。0 step 目の各節点の初期速度および初期加速度については、初期の剛体リンク系のものを用いることとする。

3. 並列的逆動力学計算法

並列的解法では、入力データとして与えられる軌道より陽に算出される節点力を、力学的な関係に基づいてトルクに換算する。節点力からトルクに換算し、マトリクス形式で表したものが次式である。

$$\{\tau^n\} = [L^n][T^n]\{P^n\} \quad (2)$$

ここで、 $\{\tau^n\}$ は求めるべき関節トルクベクトル、 $\{P^n\}$ は節点力に関するベクトル、 $[T^n]$ は全体座標系からリンクの要素座標系に変換する座標変換マトリクス、 $[L^n]$ は系の形態を表す部材長マトリクスである[3-6]。このように各変数をマトリクス形式に分離することにより、系の構造が変化した場合にも入力値の変更のみで柔軟に対応可能となる。

4. 劣駆動リンク系の数値例

数値例として、2リンク劣駆動リンク系の軌道計算および逆動力学計算を行う。2リンクともに長さ0.25[m]、質量 97.5×10^{-3} [kg]、ヤング率 2.0×10^{11} [N/m²]、断面二次モーメント 1.042×10^{-10} [m⁴]とし、2リンク目の先端に0.1[kg]の付加質点を設けた。初期の入力軌道（剛体リンク系のもの）は、2リ

ンク目の関節 J2 は固定したまま、水平面内を根元の関節 J1 のみが2秒間で π [rad]回転する軌道とする。減衰は考慮せず、時間増分10[ms]の200stepで計算した。軌道更新アルゴリズムにより得られた軌道をFig. 2(a)に示し、得られた軌道を並列的解法に入力し、算出されたトルク曲線をFig. 2(b)に示す。図から、2リンク目のトルクがほぼ0の値を維持していることが分かる。すなわち、軌道通りに動くためにトルクを必要としない、劣駆動関節を正確に表現できていることを示している。さらに、1リンク目のトルク曲線の振動はこのリンク系の固有振動であり、その周期はリンク系の姿勢により0.025[s]~0.04[s]の間で推移する。これは、片持ち梁の自由振動の場合の理論解0.031[s]とほぼ一致する。つまり、1リンク目のトルク曲線に現れる振動は、部材剛性を考慮したために発生した弾性振動に起因する。これを実際に制御に適用する場合には、この振動は制御の安定性を損う原因となる。そこで、部材変形量に対する速度、加速度ベクトルを人為的に0とすることで、1リンク目を剛体に理想化することとした。その結果、Fig. 3(a)の軌道およびFig. 3(b)のトルク曲線が得られる。Fig. 2(a)とFig. 3(a)を比較すると、算出された軌道はほぼ一致する。また、Fig. 2(b)とFig. 3(b)を比較すると、Fig. 2(b)で見られた1リンク目の振動はFig. 3(b)の曲線上で振動していたことが分かる。Fig. 3(b)の初期トルクに誤差が見られるが、この原因としては、1リンク目の部材剛性を考慮しなかった点、各節点における初期速度・初期加速度を入力軌道の剛体リンク系のものとした点が挙げられる。しかしながら、この程度の誤差であれば、制御を行う際には重大な影響を及ぼさないとと思われる。

5. 結論

本研究では、並列的解法を用いて劣駆動リンク系の逆動力学計算を行った。その結果、得られるトルク曲線から、並列的解法が劣駆動リンク系に対しても適用可能であることを確認した。今後は、多リンク劣駆動リンク系への適用および実機による制御実験などを予定している。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、(独)日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究C(課題番号:19560250)および(財)メカトロニクス技術高度化財団の助成を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 鈴木大宏, 三好渉, 中村仁彦: 非ホロノミック自由関節マニピュレータの制御, 日本ロボット学会誌, 19(4), pp.499-509, 2001.
- [2] 荒井裕彦: 非駆動関節を有する3自由度マニピュレータの非ホロノミック拘束下における可制御性, 日本ロボット学会誌, 14(5), pp.751-758, 1996.
- [3] D. Isobe: A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, Advanced Robotics, 18(9), pp.859-880, 2004.
- [4] D. Isobe, A. Yagi and S. Sato: General-Purpose Expression of Structural Connectivity in the Parallel Solution Scheme and Its Application, JSME International Journal Series C, 49(3), pp.789-798, 2006.
- [5] 磯部大吾郎, 加藤 昭博: フレキシブル・リンク系のモデルベースド・フィードフォワード制御, 日本ロボット学会誌, 25(4), pp.625-631, 2007.
- [6] D. Isobe and K. Yamanaka: Development of a Unified Feed-Forward Control System for Robotic Mechanisms using Finite Element Approach, CD-ROM Proceedings of APCOM'07-EPMECS XI, 2007, Kyoto, Japan.

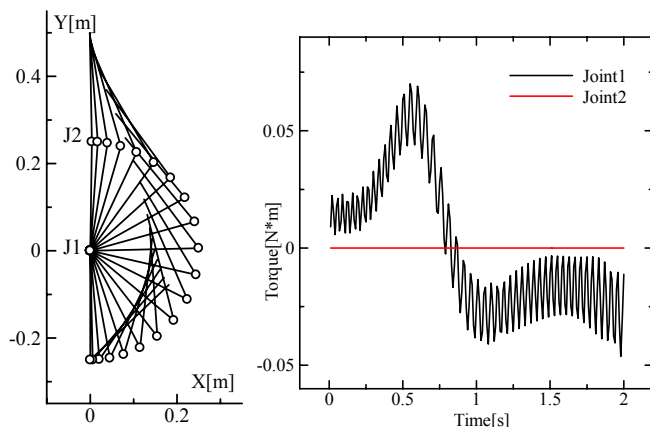


Fig. 2(a) Calculated trajectory for a two-joint underactuated link system considering the stiffness of Link 1

Fig. 2(b) Torque curves for a two-joint underactuated link system considering the stiffness of Link 1

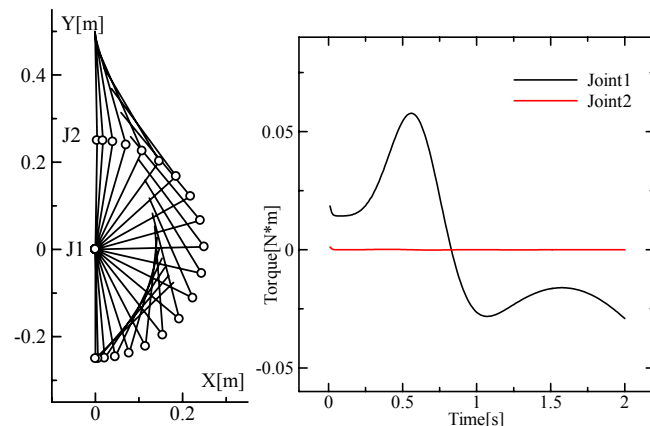


Fig. 3(a) Calculated trajectory for a two-joint underactuated link system without considering the stiffness of Link 1

Fig. 3(b) Torque curves for a two-joint underactuated link system without considering the stiffness of Link 1