

トルクユニットマニピュレータの全状態変数を 制御するための滑らかな軌道計画

—ジャークを考慮した軌道—

Planning of smooth trajectory for controlling of all state
variables of Torque-unit manipulator
-Trajectory in consideration of link jerks-

○学 河副 雅彦 (岡理大) 学 三坂 大輝 (岡理大)
正 吉田 浩治 (岡理大) 正 衣笠 哲也 (岡理大)
正 林 良太 (岡理大) 正 大須賀 公一 (阪大)

Masahiko KAWAZOE, Okayama University of Science,
Daiki MISAKA, Okayama University of Science
Koji YOSHIDA, Okayama University of Science
Tetsuya KINUGASA, Okayama University of Science
Ryota HAYASHI, Okayama University of Science
Koichi OSUKA, Osaka University

Key Words: Torque-unit Manipulator, Trajectory planning, jerk

1. 緒言

トルクユニットマニピュレータ (Torque-unit Manipulator : TUM) は関節の内部にモータを組み込まない新しいタイプの (宇宙用) マニピュレータとして提案されている⁽¹⁾ (図 1). TUM は, 各関節が 1 自由度の回転型非駆動関節で, 各リンクにはトルクユニットと呼ばれる駆動装置が任意の位置に取り付けられている. トルクユニットがリンクにトルクをおよぼし, リンクを駆動する. トルクユニットは一例としてモータと円盤で作ることができる. このような構造なので保守を容易に行うことができ, また, 冗長アクチュエータ系を構成できることなどの長所を持つ. これらから高信頼性が要求される宇宙空間のような過酷な環境下での活躍が期待される.

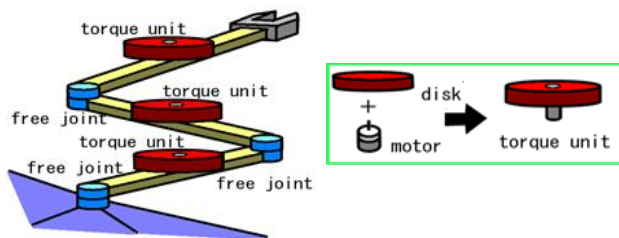


Fig.1. Torque-unit Manipulator and torque-unit

TUM は通常のマニピュレータの制御則によって, リンクの姿勢が制御できることは示されている. しかし, リンクが所望の姿勢に至った時, トルクユニット内の円盤に角速度が残留する. これが TUM の位置制御における問題点である. これまでの研究で, この問題は適切なリンクの運動軌道を生成することで解決が可能であることが知られている⁽²⁾. これまでにそのような軌道は正弦波を用いて生成したが, 加速度が不連続になっていた. これに対して, 6 次の時間に関する多項式を用いてリンクの角加速度を連続とした滑らかな軌道の生成が行われ, シミュレーションによって検証がなされた. しかし, これまでの研究では実機を想定したシミュレーションはされておらず, ジャークまでを考慮した軌道生成はされていなかった. ジャークを考慮することで目標軌道への追従性を向上させることやアクチュエータへの負荷が低減されることが知られている⁽³⁾. 本研究では TUM のリンクの目標軌道への追従性を高め, 滑らかな軌道を計画することを目的とする. その際に 8 次の時間多項を用いる. さらにシミュレーションによって検証する.

2. 3 自由度 TUM

図 2 は, 本研究で対象とする TUM である. 図に示すように 2 次元平面内のみを運動する 3 自由度 TUM であり, 重力の影響は受けないものとする. 図に示すように, リンク i の関節角度を θ_i で表し, 円盤の回転角度を φ_i で表す. このような TUM の運動方程式は導出されている⁽¹⁾.

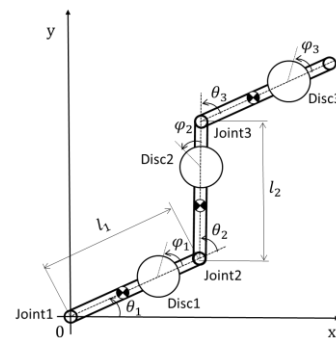


Fig.2. 3d.o.f. planar TUM

3. TUM の全状態変数の制御方策

TUM はリンクの角度のみに注目し, 円盤の運動を考慮すると, 通常のマニピュレータと同じ運動方程式となり容易に制御系を構成することができる. しかし, 従来の制御則を用いた場合, リンクに対して位置制御を行った際には, 目標位置に至った時, 円盤に角速度が残留するという問題が発生する. この問題に対しては, これまでの研究結果により, 運動方程式に基づいて, 次の 2 つの Phase を経ることで解決できることが示されている⁽²⁾.

Phase1: リンクを初期位置から目標位置まで移動させる

Phase2: リンクの目標位置から運動させ元の位置に戻す.

Phase2 の運動軌道を適切に設計し, その軌道にリンクを追従させることで, リンクが元の位置に戻った時点で円盤の残留角速度を 0 にする.

4. ジャークを考慮した軌道の生成

リンクが **Phase1** によって目標姿勢に至ったとき円盤 $i+1$ の残留角速度が $\dot{\varphi}_{i+1}$ であったとする. この後, **Phase2** のために, リンクを再び運動させて, 再び目標姿勢に戻るリンクの運動軌道を生成する. $\theta_i(t)$ が次の条件を満たすとき円盤 i の残留角速度は 0 rad/s となる.

$$\begin{cases} \theta_i(0) = \theta_i(T) \\ \dot{\theta}_i(0) = \dot{\theta}_i(T) = 0 \\ \ddot{\theta}_i(0) = \ddot{\theta}_i(T) = 0 \\ \int_0^T \dot{\theta}_i^2 dt = \frac{I_{di+1}(\dot{\phi}_{i+1})}{l_i R_{i+1} \sin \theta_{i+1}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \theta_{i+2}(0) = \theta_{i+2}(T) \\ \dot{\theta}_{i+2}(0) = \dot{\theta}_{i+2}(T) = 0 \\ \ddot{\theta}_{i+2}(0) = \ddot{\theta}_{i+2}(T) = 0 \\ \dot{\theta}_{i+2} = -\dot{\theta}_i \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_m(t) = 0, \quad m \neq i, i+2, \quad (5)$$

ここで、 T は制御時間、 I_{di+1} , l_i , R_{i+1} はリンクや円盤の物理量によって決定される量である。

また、目標軌道を

$$\theta_i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 + a_6 t^6 + a_7 t^7 + a_8 t^8 \quad (6)$$

によって与え、 $a_0 \sim a_8$ を決定する。ジャークを考慮した軌道とは、ジャークをある値に設定し、運動時間内で設定値を超えない軌道のことを示す。本研究では $t=0$ と $t=T$ の時にジャークの値を設定することでその軌道を実現する方法を採った。ジャークを考慮した軌道のために(3),(4)の条件に加えて次の拘束条件を与えた。また、 j_1, j_2 はジャークの設定値である。

$$\ddot{\theta}_i(0) = j_1, \ddot{\theta}_i(T) = j_2 \quad (7)$$

5. 3自由度 TUM によるシミュレーション

3 自由度 TUM を対象に前節の運動軌道を用いてシミュレーションを行う。ここでは制御則として PD 型二重構造ロボスト制御を用いる⁽⁴⁾。

シミュレーションの結果を図 3, 4 に示す。図 3 では各円盤の角速度の変化を、図 4 ではリンクが目標姿勢に至るまでを含んだリンクジャークの変化を表している。図 4 の破線はジャークの設定値を示す。図 3, 4 において次のように運動させた。

- ($0 \leq t \leq 10$): リンクの目標姿勢へ制御,
- ($10 \leq t \leq 12$): 状態の保持
- ($12 \leq t \leq 22$): 円盤 3 の残留角速度を 0 に漸近させる
- ($22 \leq t \leq 23.5$): 状態の保持
- ($23.5 \leq t \leq 33.5$): 円盤 2 の残留角速度を 0 に漸近させる
- ($33.5 \leq t \leq 35$): 状態の保持

図 3, 4 より、残留角速度がほぼ 0 rad/s になっていること、また、ジャークは設定した値内に収まっていることが分かる。

次に、初期状態のリンク 1, 2, 3 を $-\frac{2}{9}\pi(\text{rad}), \frac{1}{9}\pi(\text{rad}), \frac{1}{6}\pi(\text{rad})$ とし、目標状態のリンク 1, 2, 3 を $-\frac{11}{18}\pi(\text{rad}), -\frac{5}{18}\pi(\text{rad}), -\frac{1}{3}\pi(\text{rad})$ に変更し、シミュレーションを行った。シミュレーション結果のリンクジャークを図 5 に示す。この場合、軌道を生成することができるがジャークは設定値内に収まらなかった。それらに対しては Phase2 での制御時間 T を変更することで解決可能であり、ジャークが設定値内に収まることを確認した。

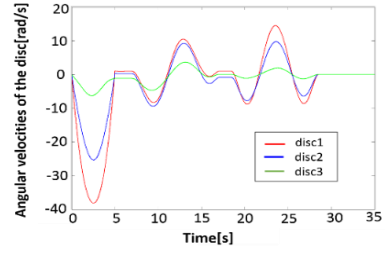


Fig.3. Simulation result of angular velocities of the discs

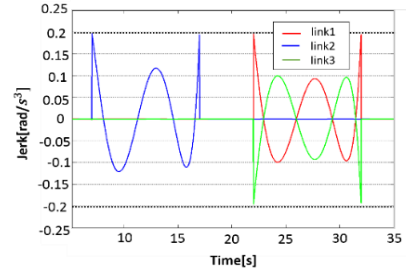


Fig.4. Simulation result of jerks of the links

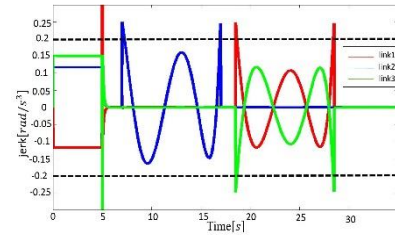


Fig.5. Simulation result of jerks of the links in case of another condition

6. 結言

本研究では、TUM の位置制御において円盤の残留角度を 0 にするためのジャークを考慮した運動軌道を生成した。また、そのシミュレーションを行った。初期条件と目標状態を様々に変えたシミュレーション結果からジャークが制限値を超える軌道があったが制御時間を変更することで解決できる場合があることが分かった。しかし、初期状態と目標状態の組み合わせによっては軌道が計画できない場合があることも分かった。

今後の課題としてジャークを考慮した軌道を計画できるか否かを判定し、計画できる場合は軌道を再計画するソフトウェアを作成する。

参考文献

- [1]大須賀公一, 吉田浩治, 小野敏郎, “トルクユニットマニピュレータの提案”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.7(1996), pp.104-111.
- [2]吉田浩治, 大須賀公一, “トルクユニットマニピュレータの全状態変数を制御するための運動軌道に関する考察”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.4(2000), pp.612-615.
- [3]K. Petrinec, Z. Kovacic, “Trajectory planning algorithm based on the continuity of jerk”, 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, (2007)
- [4]大須賀公一, 杉江俊治, 小野敏郎, “マニピュレータ PD 型二重構造ロボストモデル追従制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.1(1989), pp.46-53