

標準線形固体モデルを用いたマニピュレータの変形挙動生成

Deformable Behavior Generation of a Manipulator Using Standard Linear Solid Model

正 妹尾 拓(東大) 正 村上 健一(東大) 正 石川 正俊(東大)

Taku SENOO, University of Tokyo, Taku_Seno@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

Kenichi MURAKAMI, University of Tokyo

Masatoshi ISHIKAWA, University of Tokyo

In this study, passive dynamic control of a manipulator is designed and realized. The control strategy is based on the idea that the shift in position and posture of an end effector attributable to an external force is regarded as deformation of the robot. The standard linear solid (SLS) model is used to generate the deformable behavior, which describes the combination of plastic and elastic deformation. In addition, the relation between the SLS model and Maxwell/Voigt models are analyzed. Physical simulations with a robotic arm are executed to validate and analyze the proposed control law.

Key Words: Plastic deformation, Impedance control, Passive behavior generation

1 はじめに

外力に対するロボットの柔軟性をサーボ制御で実現するためには、一般的にインピーダンス制御が使われている。その制御手法には多数の方式が提案されており、力センサを必要とせずに位置と速度からフィードバックする方法 [1]、関節独立なコンプライアンスの調整によって手先のコンプライアンスを設定する手法 [2]、動力学補償を施して線形ダイナミクスに変換する方法 [3]、外乱やモデル化誤差の影響を軽減するためのロバスト改善手法 [4]、視覚情報を用いて仮想表面を設定することで接触前からインピーダンスを調整する方法 [5] などが研究されている。

従来のインピーダンス制御は、基本的にバネとダンパを並列に接続したモデルをベースとしている。そのため変位 0 の元の位置へ戻るような弾性的反発力が常に発生し、外力を自然に受け流すような可塑的挙動を実現することが困難であった。これに対し、妹尾らは、塑性変形に基づいた低反発特性を有する受動的力制御を提案している [6]。そのモデルはバネとダンパを直列に接続しており、従来とは対照的なアプローチで構成されている。このアーキテクチャを実現する研究として、機械的な板バネとサーボ制御によるダンピングを統合したショックアブソーバの開発 [7] や、サーボ制御により全てのインピーダンスパラメータを調整可能な制御則が提案されている [8]。また、塑性変形/弾性変形の両者の特性を実現するために、変形モードを空間的/時間的にそれぞれ分離して割り当てる制御則も提案されている [9]。

本論文では、より多様な変形挙動をロボットで実現するために、塑性変形モデルと弾性変形モデルを内包した標準線形固体 (Standard Linear Solid: SLS) モデルに基づく変形制御を実現する。始めに、本研究のコンセプトについて説明して SLS モデルの運動方程式を導出し、塑性変形モデル/弾性変形モデルとの関係について解析する。次に、多関節アームにおいて SLS モデルの変形特性を達成するための制御則を導出し、物理シミュレーションによって制御則を検証する。最後に、結論と今後の課題について述べる。

2 標準線形固体モデルの挙動特性

2.1 コンセプト

本論文のコンセプトは、図 1 のように外力に起因する手先の位置姿勢変化を「ロボットの变形」と捉えることである。このコンセプトに基づき、変形モデルを導入することでロボットの受動的挙動を生成することを考える。

物質の变形や流動に関するレオロジーの分野において、線形粘弾性要素で構成された基本的なモデルとして、塑性変形を示す Maxwell モデルと弾性変形を示す Voigt モデルがある。各々の

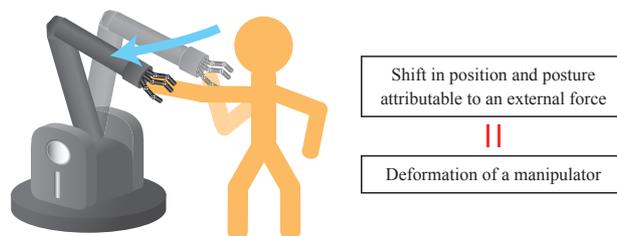


Fig.1 Concept of this research

モデルは、物理的には応力緩和とクリープの現象をそれぞれ表現可能である。ロボットの力制御としてよく用いられる従来のインピーダンス制御は、Voigt モデルで構成されていることに注意する。一般的に実際の物質の挙動は、どちらか一方の特性で表現できることは少なく、その両方の性質を有することが知られている [10]。そこで本論文では、変形制御を構成するモデルとして、塑性変形モデルと弾性変形モデルを内包した標準線形固体モデルを取り上げる。Maxwell モデルと Voigt モデルを時間的/空間的に分離して実装していた論文 [9] とは異なり、塑性変形と弾性変形の特性を同時に重ね合わせた挙動が実現可能となる。

2.2 Maxwell モデルと Voigt モデル [8]

接続したバネとダンパの一端を固定し、他端の手先に質量 M が集中している系を考える。バネ定数を K 、粘性係数を C と置き、手先に外力 F が作用するときの手先の運動 $x_e \equiv x - x_0$ を考える。ここで、 x と x_0 は手先の現在位置と基準位置である。通常のインピーダンス制御において x_0 は目標軌道に該当する変数となるのに対し、変形制御では基準位置の定数となることに注意する。また、インピーダンスパラメータは定数とする。

バネとダンパを直列に接続した Maxwell モデルは、手先変位 x_e が次式の運動方程式で表される。

$$M\ddot{x}_e + KC^{-1}M\dot{x}_e + Kx_e = F + KC^{-1}\int Fdt, \quad (1)$$

外力が $F=0$ になっても積分項が残ることから、変位が 0 に戻らずに離れた位置で均衡するため、塑性変形を意味していることがわかる。

バネとダンパを並列に接続した Voigt モデルは、機械インピーダンスとしてよく知られた次式の運動方程式で表される。

$$M\ddot{x}_e + C\dot{x}_e + Kx_e = F, \quad (2)$$

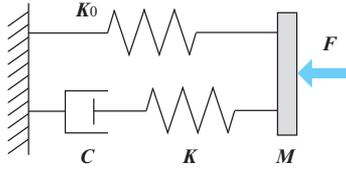


Fig.2 Standard linear solid model

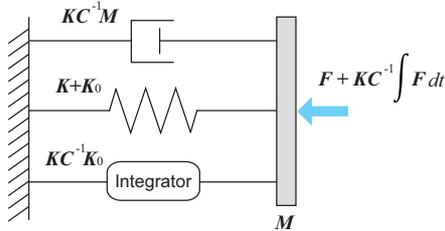


Fig.3 Perfectly parallel expression of the SLS model

外力が $F=0$ になると変位が $x_e \rightarrow 0$ へ収束するため、弾性変形を意味していることがわかる。

2.3 標準線形固体モデル

Maxwell モデルと Voigt モデルを内包した標準線形固体モデルについて考える。図 2 に示すように、バネとダンパを直列に接続した Maxwell 部に対して、バネ定数 K_0 のバネが並列に取り付けられている。Maxwell 部における手先変位はバネとダンパの変位の和であることを考慮すると、運動方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_e &= F - K(x_e - p_e) - K_0 x_e, \\ K(x_e - p_e) - C\dot{p}_e &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $p_e \equiv p - p_0$ はダンパの変位であり、 p と p_0 はダンパの現在位置と基準位置である。上式を連立して p_e を消去すると、手先の運動が表現できる。

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_e + KC^{-1}M\dot{x}_e + (K_0 + K)x_e + KC^{-1}K_0 \int x_e dt \\ = F + KC^{-1} \int F dt, \end{aligned} \quad (4)$$

Maxwell モデルと同様に外力積分項が現れていると同時に、変位積分項も現れている点が特徴である。数学的には SLS モデルは手先変位 x_e に関して式 (4) を微分した 3 階微分方程式で表されるが、力学的な運動方程式としての表現と制御への適用、および Maxwell モデル/Voigt モデルとのアナロジーを考慮すると、2 階微分までを用いた式 (4) の形で表現することが有用である。

SLS モデルは直列表現と並列表現の混合モデルであるが、式 (4) のように手先変数のみで表現することによって、図 3 のように各要素を全て並列に接続した完全並列表現へ変換可能であることがわかる。ここで、機械的な積分器に相当する機能が存在していることに注意する。本来、SLS モデルは比例器のバネと微分器のダンパで構成されているが、それらの直列/並列の組み合わせによって積分器の機能が内在していることが特徴である。

式 (4) において $K_0 \rightarrow 0$ のときは式 (1) の Maxwell モデルに帰着することがわかる。また、式 (4) に対して両辺に左から CK^{-1} をかけると次式になる。

$$\begin{aligned} CK^{-1}M\ddot{x}_e + M\dot{x}_e + C(K^{-1}K_0 + I)x_e + K_0 \int x_e dt \\ = CK^{-1}F + \int F dt, \end{aligned} \quad (5)$$

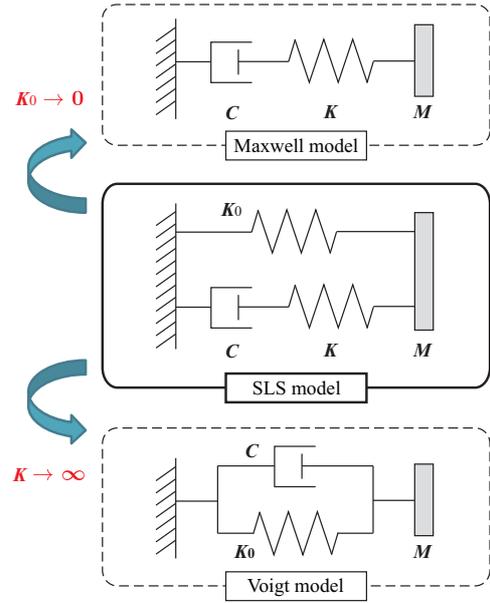


Fig.4 Relation between the three models

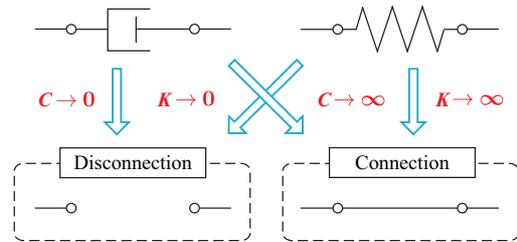


Fig.5 Connecting condition for the limiting values

ここで、 I は単位行列である。式 (5) において $K^{-1} \rightarrow 0$ のときは次式となる。

$$M\ddot{x}_e + Cx_e + K_0 \int x_e dt = \int F dt, \quad (6)$$

この両辺を微分すると、式 (2) の Voigt モデルに帰着することがわかる。これらの関係を図 4 に示す。

以上より、図 5 のように、インピーダンスパラメータの値をゼロにすることは機械要素を除去して前後の接続を切断することに相当する一方、値を無限大にする（逆行列をゼロにすること）は機械要素を除去して前後の接続状態を維持することに相当することがわかる。よって、基本的には並列部分の機械要素を取り除く場合はゼロへ、直列部分の機械要素を取り除く場合は無限大への極限操作をおこなえばよい。

3 変形制御則

関節変数を q で表現したロボットアームのダイナミクスは、関節座標において以下の式で表される。

$$M_q \ddot{q} + h = \tau + J^T F, \quad (7)$$

ここで、 M_q は慣性行列、 h は遠心力・コリオリ力・重力・摩擦力の合力、 τ は駆動力、 J は手先のヤコビアン、 F は外力である。 s 次元作業座標における手先位置 x は以下の条件を満たす。

$$\dot{x} = J\dot{q}, \quad (8)$$

関節の自由度が作業座標の次元数 s と同一であり、適当な範囲で $\text{rank } J = s$ が成立すると仮定する。このとき、式 (8) を用い

Table 1 Values of the impedance parameters

2-DOF arm			
m_1 [kg]	m_2 [kg]	c_1 [Ns/m]	c_2 [Ns/m]
1.0	0.80	10.0	10.0
Desired impedance			
m_d [kg]	c_d [Ns/m]	k_d [N/m]	k_{0d} [N/m]
2.0	4.0	50.0	10.0

て式 (7) のダイナミクスを作業座標で表現すると以下のようになる。

$$(J^{-T}M_qJ^{-1})\ddot{x} + J^{-T}(h - M_qJ^{-1}\dot{J}\dot{q}) = J^{-T}\tau + F, \quad (9)$$

目標インピーダンスを M_d , C_d , K_d , K_{0d} と設定すると, SLS モデルの応答特性を実現するための制御則は, 式 (4) と式 (9) を用いて以下のように計算される。

$$\tau = \tau_{NC} + \tau_{VE} + \tau_{IN} + \tau_{PL}, \quad (10)$$

where

$$\begin{aligned} \tau_{NC} &\equiv h - M_qJ^{-1}\dot{J}\dot{q}, \\ \tau_{VE} &\equiv -E \left[K_d C_d^{-1} M_d \dot{x} + (K_{0d} + K_d) x_e \right. \\ &\quad \left. + K_d C_d^{-1} K_{0d} \int x_e dt \right], \\ \tau_{IN} &\equiv (E - J^T) F, \\ \tau_{PL} &\equiv E K_d C_d^{-1} \int F dt, \\ E &\equiv M_q J^{-1} M_d^{-1}, \end{aligned}$$

ここで, τ_{NC} が非線形補償項, τ_{VE} が粘弾性設定項, τ_{IN} が慣性調整項, τ_{PL} が可塑性表現項となっている。 τ_{PL} からわかるとおり, 外力積分項に相当する疑似的な力を制御入力によって補償する必要がある。 τ_{VE} が変形基準位置に対する PID 制御となっていることが SLS モデルに起因する特徴である。

4 物理シミュレーション

4.1 シミュレーション設定

ロボットの手先に対して外力が働くときの挙動を解析する。ロボットアームは, 水平面内で駆動する 2 自由度の回転関節で構成された機構を用いる。つまり, $s=2$ のときに該当し, xy 平面におけるロボットの運動を考える。関節およびリンクは台座側から手先に向けて順に通し番号を設定し, リンク i の質量, 関節 i の粘性摩擦係数をそれぞれ m_i , c_i とする。目標インピーダンスを対角行列とし, x 方向と y 方向の値を同一と設定した。パラメータの数値は表 1 のように決定し, 外力は $F = [2.0, 2.0]^T$ と $F = [0.0, 0.0]^T$ の状態を切り替えて与えた。

4.2 外力に対するシミュレーション結果

定常外力 $F = [2.0, 2.0]^T$ を与えたときの挙動を図 6(a) に示す。動き始めのときは外力と同じ向きに変位し続ける塑性変形のように可塑的挙動が観測される一方, $t = 1.3$ 秒を経過したあたりで変位が飽和し, $t = 1.8$ 秒あたりから反対向きに押し戻される弾性挙動が観測されている。これは, 変位の蓄積と時間経過によって制御の I 成分の影響が大きくなるためである。最終的には, 変位の積分と外力の積分が平衡するところへ収束していく。以上より, Maxwell モデルと Voigt モデルの両者の性質を有する運動が実現できていることが確認できた。続いて, 外力を $t = 2$ 秒まで $F = [2.0, 2.0]^T$ とし, $t = 2$ 秒以降は $F = [0.0, 0.0]^T$ へ切り替えたときの挙動を図 6(b) に示す。2 秒までは図 6(a) と同一の挙動を示し, 2 秒以降は変位 0 の位置へ向かって運動し始めることがわかる。I 成分の積分動作による影響で位相が遅れた挙動となっており, いったんオーバーシュートした後にゆっくりと時間をかけて元の位置姿勢へ戻っていく様子が観測できる。Voigt モデルの場合の周期的な減衰振動とは異なり, SLS モデル特有の挙動生成が可能であることが確認できた。シミュレーション動画は Web サイト [11] から見る事ができる。

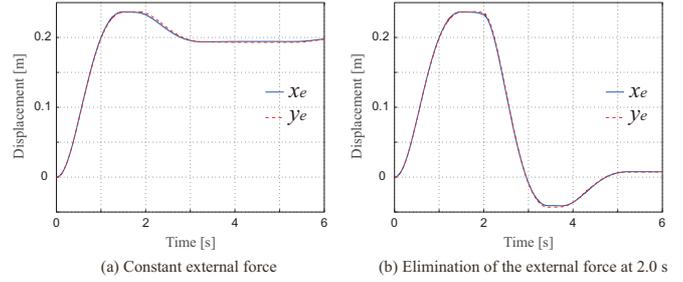


Fig.6 Simulation results for external force

5 まとめ

本論文では, 塑性変形と弾性変形の性質を重ね合わせた変形挙動を生成するロボット制御を実現した。変形モデルとして, Maxwell モデルと Voigt モデルを内包する標準線形固体モデルを取り上げ, ダイナミクスを導出した。SLS モデルでは, パネとダンパの比例器および微分器のみで構成されているにも関わらず, 完全並列表現では積分器に相当する機能を内在していることを示した。また, インピーダンスパラメータの極限操作と機械要素除去に関する接続/切断関係について解析した。これにより, 変形モデルを切り替えることなくインピーダンスパラメータを調整することによって, Maxwell/Voigt モデルの挙動も同一の制御則で実現することが可能となった。SLS モデルの挙動を実現する制御則を導出し, 変形基準位置を目標値とした作業座標での PID 成分を含む形式となっていることを示した。物理シミュレーションにより, 提案手法の有効性を実証した。

今回提案した制御手法は, 論文 [8] における並列表現ベースの制御則に該当するため, 今後の課題は直列表現ベースの制御則を確立することである。さらに実験的に検証することで, ロボットの安全技術や作業支援として応用することである。

参考文献

- [1] J. K. Salisbury: "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", Proc. of IEEE Int. Conf. on Decision Control, pp. 95-100, 1980.
- [2] 金子真, 横井一仁, 谷江和雄: "シリアルリンクアームのダイレクトコンプライアンス制御 (第 1 報, 基本概念と非干渉化条件)", 日本機械学会論文集 (C 編), vol. 54, no. 503, pp. 1510-1514, 1988.
- [3] N. Hogan: "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I - Theory", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 107, no. 1, pp. 1-7, 1985.
- [4] W. S. Lu and Q. H. Meng: "Impedance Control with Adaptation for Robotic Manipulations", IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 408-415, 1991.
- [5] A. Castano and S. Hutchinson: "Visual Compliance: Task-Directed Visual Servo Control", IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 10, no. 3, pp. 334-342, 1994.
- [6] 妹尾拓, 小池正憲, 村上健一, 石川正俊: "インピーダンス制御によるマニピュレータの可塑的挙動生成", 第 21 回ロボティクスシンポジウム, 講演論文集, pp. 111-116, 2016.
- [7] T. Senoo, M. Koike, K. Murakami and M. Ishikawa: "Visual Shock Absorber Based on Maxwell Model for Anti-Rebound Control", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1640-1645, 2015.
- [8] T. Senoo, M. Koike, K. Murakami and M. Ishikawa: "Impedance Control Design Based on Plastic Deformation for a Robotic Arm", IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 1, pp. 209-216, 2017.
- [9] T. Senoo, G. Jinnai, K. Murakami and M. Ishikawa: "Deformation Control of a Multijoint Manipulator Based on Maxwell and Voigt Models", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2711-2716, 2016.
- [10] A. Takacs, J. K. Tar, T. Haidegger and I. J. Rudas: "Applicability of the Maxwell-Kelvin Model in Soft Tissue Parameter Estimation", Proc. of Int. Symposium on Intelligent Systems and Informatics, pp. 115-119, 2014.
- [11] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/DeformationControl/>