アニメーションを用いた制御結果の表示*

足立 修一**

Demonstration of Control Results by Using Animation*

Shuichi ADACHI**

1. はじめに

設計された制御系の性能を示す方法は、大きく分けて、計算機を利用した数値シミュレーション実験と実験装置あるいは実機を用いた制御実験の二通りある。もちろん実験装置などを用いて制御性能を確認する重要性は誰しも認めるところであるが、大学等の教育機関では、経済的あるいは技術的な理由から、必ずしもすぐに高精度な実験を行えないことが多い。しかしながら、数値実験によるグラフの呈示だけでは、システム制御工学の教育効果は期待できない。

本報告では、制御結果をアニメーション化することにより、実際のモノの動きを視覚化する方法を提案する。この背景には、高速な計算機が比較的安価に利用できるようになり、今後積極的にシステム制御工学の教育にも計算機の利用が望まれている点が挙げられる。とくに、最先端の制御理論を手軽に模擬実験できる手段としてアニメーションは有効である。

ここでは、非線形システムに対する制御系設計理論が活発に研究されている点に着目し、非線形システムの一例としてシーソーシステムを採用し、非線形制御系の設計を行う。そして、制御結果をマッキントッシュ計算機 (Apple 社) 上に、MATLAB (The Math Works 社) と Quick Time (Apple 社) というソフトウェアを用いてアニメーション化した例を報告する。Quick Time を用いることにより、サンプリング周期を陽に考慮することができるため、実際の動きに近いアニメーションを作成することができ、制御の教育上、有用であると思われる。

* 原稿受付 1994年2月10日

** 宇都宮大学 工学部 Faculty of Engineering, Utsunomiya University; 2753 Ishiimachi, Utsunomiya city, Tochigi 321, JAPAN

Key Words : animation, control education, visualization, nonlinear control system, MATLAB.

2. シーソーシステム

Fig. 1 に示すシーソーシステムを制御対象とする^{1),2)}。ここで、板の慣性モーメントを J 、ボールの質量、慣性モーメントをそれぞれ M, J_b 、ボールの半径を R 、重力加速度を G 、板の角度を θ 、ボールの位置を r 、板に加えられるトルクを τ とすると、状態方程式

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \\ y = h(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1)$$

が得られる。ただし、入力 u は非線形フィードバック

$$\tau = 2Mrr\dot{\theta} + MGr \cos \theta + (Mr^2 + J + J_b)u \quad (2)$$

により定義される新しい入力である。また、

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ B(x_1 x_4^2 - G \sin x_3) \\ x_4 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$h(\mathbf{x}) = x_1$$

とおいた。なお、

$$\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T = (r \ \dot{r} \ \theta \ \dot{\theta})^T$$

$$B = \frac{M}{\frac{J_b}{R^2} + M}$$

Fig. 1 Seesaw system

である。この非線形システムの相対次数は well-defined でないため、厳密な入出力線形化を適用できず、また integrability 条件を満たさないため、状態の線形化も行えないことが知られている。したがって、シーソーシステムは比較的構造が簡単でありながら、近年研究が盛んに行われている厳密な線形化が適用できない典型的な例題である。本報告では、Kokotovic らが提案した入出力近似線形化¹⁾を用いて非線形制御系を設計するが、詳細は省略する。

3. アニメーションの作成

アニメーションの作成手順を以下に示す。

- Step 1** 非線形コントローラ（近似入出力線形化により設計）により制御されたボールの位置とシーソーの角度を計算する。
- Step 2** MATLAB の PLOT コマンドを用いて、各時刻におけるボールの位置とシーソーの角度より、アニメーションのセル（アニメーションのひとコマのこと）を作成する³⁾。
- Step 3** 作成されたセルを、アニメーション作成用のソフトウェア (Magic : MacroMind/Paracomp 社) に取り込み、背景などを書き加え、処理する。
- Step 4** Quick Time を用いることによって、アニメーションのサンプリング時間（コマごとの時間間隔のこと）を指定し、実際の動きを再現する。

4. 例題

シーソーシステムの物理パラメータを $M = 0.05$ (kg), $R = 0.01$ (m), $J = 0.02$ (kg · m²), $J_b = 2 \times 10^{-6}$ (kg · m²), $G = 9.8$ (m/s²) として数値シミュレーションを行った。このとき、MATLAB により描かれたアニメーションの一例を Fig. 2 に示した。また、背景を書き

Fig. 2 An example of animation using MATLAB

Fig. 3 A refined picture for animation

加えたセルの一例を Fig. 3 に示した。アニメーションを紙面に紹介することはできないが、実際の動きに近い結果が得られた。

5. おわりに

本報告では、アニメーションを用いて制御結果を表示する方法を提案した。本方法では、サンプリング時間を考慮してアニメーションを作成できるので、実機と同じ時間スケールが実現できた。現時点ではアニメーション作成に非常に時間がかかるという問題点があるが、今後ソフトウェアの進歩により、これは解決できると考えている。また本報告では、制御結果をすべて計算した後、アニメーションの作成を行っているが（すなわち、オフライン処理）、今後、制御結果をオンライン処理して、アニメーションを作成していきたいと考えている。本報告で提案したような、計算機という仮想世界の上で制御実験を模擬する方法は、今後制御工学の教育においても、重要になっていくものと思われる。最後に、ソフトウェアの作成にご協力いただいた本学佐々木君、須永君に感謝します。

参考文献

- 1) J. Hauser, S. Sastry and P. Kokotovic : Nonlinear Control via Approximate Input-Output Linearization : The Ball and Beam Example ; IEEE Trans. on Automat. Contr., Vol. 37, No. 3, pp. 392~398 (1992)
- 2) P. V. Kokotovic : The Joy of Feedback : Nonlinear and Adaptive ; IEEE Control Systems Magazine, pp. 7~16 (1992)
- 3) 足立, 佐々木, 須永 : MATLAB を用いた非線形制御系のアニメーション ; 第 36 回自動制御連合講演会前刷, pp. 169~170 (1993)