柔軟構造物搬送用ロバストアシストのための 周波数成形外乱包含最適制御の適用*

原 進^{*1}

Application of Frequency-Shaped Disturbance Accommodating Optimal Control to Robust Assist for Conveyance of Flexible Structures

Susumu HARA^{*1}

^{*1} Nagoya Univ. Dept. of Mechanical Science and Engineering, Graduate School of Engineering
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Power assist systems have been introduced to reduce workers' load in industrial production. The author has studied on control systems for power assisted conveyance of flexible structures. Generally, the systems include influences of various kinds of uncertainties. One of them is vibration influence of controlled objects to operators. Another one is structured uncertainty such as nonlinear friction or parameter variations. The author's previous paper proposed a robust assist system design by taking these uncertainties into account. It consisted of an impedance controller, a disturbance accommodating optimal controller, a disturbance observer and a reaction force controller. However, the nonlinear friction such as Coulomb friction often induces chattering motion. Such a motion may cause a controlled object spill-over instability because the previous control system design does not take influences of unstructured uncertainties into account. Therefore, this note provides a modified version of the previous design by using the frequency-shaped disturbance accommodating optimal control. This note adopts the same controlled object as the author's previous paper. The effectiveness of the modification is verified by simulations.

Key Words : Motion Control, Robust Control, Vibration Control, Flexible Structure, Optimal Control, Power Assist, Impedance Control, Frequency-Shaped Disturbance Accommodating Control, Disturbance Observer, Reaction Force Control

1. はじめに

著者らは前報(1)において、生産現場における作業の例として人による機械構造物の搬送に着目し、それに伴う多様な不安要因へのロバストなアシストを実現するシステムの設計法、特に制御系設計法を提案した。そして、自走台車型パワーアシストシステム(図1)への応用例を示した。具体的には、文献(2)の研究成果を発展させることで、作業者が台車に与えるパワーをアシストするためのインピーダンス制御、台車の特性を搬送される構造物に対する外乱のダイナミクスとみなして、振動の影響を抑制する外乱包含最適制御、台車と床の間もしくは駆動系自身が有する非線形摩擦の影響を低減する外乱オブザーバ、ならびに構造物から作業者に伝わる反力の影響を低減する反力制御で構成されている。この制御系の概念を図2に示す。

前報で提案したロバストアシストシステムは、作業者の有する不安要因に合わせて必要なアシストを選択することもできる。例えば、構造物が軽量であり、筋負担の軽減を考慮する必要のない場合には、パワーアシスト(インピーダンス制御)を行う必要はない。さらに、作業者の年齢やスキルによって、パワーをアシストする度合いも変わってくる。また、構造物が剛体とみなすことができ、振動の影響を考慮する必要のない場合には、振動制御(外乱包含最適制御)を行う必要はない。前報でいう「ロバストアシスト」とは、作業者が制御対象や作業環境

* 原稿受付 2011 年 12 月 26 日

^{*1} 正員, 名古屋大学 大学院工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail: haras@mech.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Controlled object and its model in the author's previous paper (1)

Fig. 2 Scheme of "Robust Assist"

の状況，作業者自身が持つ不安要因や作業者の嗜好などに応じて制御要素を適切に取捨選択することもできる，見通しのよい設計が可能なアシストシステムを意図している．本制御系を適用すると，台車の応答は構造物の特性によらず，同じ操作力に対しては常に同じ応答を示す．本制御系は特に次のような場面，事前の知識や視覚情報が乏しく，構造物の質量が直感的に推測できない事例（ブラックボックスの搬送，暗所での作業など）などに対して有用と考えられる．

しかしながら，例えば非線形摩擦の影響が極めて大きい問題では，外乱オブザーバを用いてそれを完全に除去しようとしても，チャタリングのような運動を発生する場合があります．これが制御対象の高次残余モードを励起するスピルオーバー不安定の原因となることがあり得る．特に，図1右側の前報のモデルでは，搬送運動を実現する台車と振動系の間が振動制御用アクチュエータのみで連結されているのが特徴であった．このモデルでは，文献(2)で説明しているように，台車部の状態量もフィードバックされなければ振動系の位置が定まらない．そのため，文献(2)では，振動系のみならず台車のダイナミクスも包含した拡大系に対する外乱包含最適制御を適用していた．よって，搬送運動に何らかの外乱が影響した場合，振動制御入力に外乱の影響もフィードバックされてしまう点に注意を要する．この影響が高周波数帯域にあれば，構造物を高周波数で加振してしまうことにつながる．これは，スピルオーバー不安定を避ける目的のみならず，微細な構造物の搬送や危険物の搬送にとっても好ましくない．そこで，本ノートでは振動制御への高周波数帯域の影響を絶縁する目的から前報の外乱包含最適制御を，高周波数帯域遮断特性を持たせた周波数成形外乱包含最適制御に取り替える改善策を示す．このような最適制御の周波数成形化は，制御対象となる構造物の高次残余モードを励起しない目的で付加することはよく行われてきた⁽³⁾．ところが，本ノートの場合には，むしろ図1右側のモデルの構成に由来する台車側での高周波数帯域の外乱の影響を絶縁する目的で適用する点に注意されたい．よって，一見すると振動制御設計の観点からは高次残余モード

が問題とならない周波数に存在するような柔軟構造物であっても、搬送に注意を要する微細構造物や危険物などではこの周波数成形を積極的に、場合によっては予防的にも適用すべきである。そのような立場から本ノートで示す改善策はロバストアシストの適用において重要な意味を持つ。前報同様の制御対象、制御問題に対して、シミュレーションによりこの改善策の有効性を示す。

2. 周波数成形外乱包含最適制御の適用

本ノートで適用する制御対象とそのモデル化、ならびに制御問題と制御系設計の一部に関しては前報(1)に詳しく記載されているので省略する。本章では、前報と異なる周波数成形外乱包含最適制御の適用について説明する。

振動制御アクチュエータへの制御入力を高周波数帯域で遮断することを目的として以下のような2次ローパス特性を考える⁽⁴⁾。

$$R(s) = \frac{\omega_R^2}{s^2 + 2\zeta_R \omega_R s + \omega_R^2} \quad (1)$$

ここで、 ω_R は遮断角振動数、 ζ_R は減衰比を意味する。式(1)の特性を状態空間で実現した式(2)を含めて、前報の式(10)との拡大系を式(3)のように考える。

$$\begin{aligned} \dot{x}_R(t) &= A_R x_R(t) + b_R u_R(t) \\ u_k(t) &= c_R x_R(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_a(t) &= A_a x_a(t) + b_a u_R(t) + g_a w_k(t) \\ x_a(t) &= \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_R(t) \end{bmatrix}, A_a = \begin{bmatrix} A_k & b_k c_R \\ 0 & A_R \end{bmatrix}, b_a = \begin{bmatrix} 0 \\ b_R \end{bmatrix}, g_a = \begin{bmatrix} g_k \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $u_R(t)$ は拡大系(3)に対する仮想の制御入力を意味し、実際の振動制御入力は前報と同じ $u_k(t)$ である。添字 k の行列、ベクトルは前報で示した各要素と同じである。式(3)に対して、前報同様の最適レギュレータを求めることで前報の外乱包含最適制御を周波数成形した周波数成形外乱包含最適制御が実現できる。制御系全体の

Fig. 3 Modified control system diagram

構成図は前報図 8 から本ノートの図 3 のように修正される．右下部に周波数成形部（高周波数帯域遮断部）が追加されている．

3. シミュレーションによる検討

前報(1)と同じ条件でシミュレーションによる検討を行う．ただし，前報での台車部の固体摩擦を表現するための動摩擦力 f_r は 9.5 N であったが，本ノートでは 3.0 倍の 28.5 N とし，前報の実験装置よりもはるかに影響が大きい場合をシミュレーションにより考察する．本章で適用するインピーダンスパラメータは前報と同じ $m_{id} = 5.0 \text{ kg}$ ， $c_{id} = 5.0 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ を用いた．また，最適制御設計のための重みも種類，値とも前報と同じ， $q_v = 2.5 \times 10^3$ ， $q_s = 2.5 \times 10^5$ とした．本ノートでも，前報同様，前報中の図 1 1 の場合の実際の操作力（図 1 1 (d)）を計算機メモリに記録し，これを図 1 右側のモデルに与えることでシミュレーションを行う．外乱オブザーバも前報と同じものを適用している（1 次ローパスフィルタの遮断角振動数 ω_{dob} は 60.0 rad/s である．）．前報の制御系をそのまま適用した場合の結果と，本ノートの周波数成形外乱包含最適制御を適用する場合のシミュレーション結果を図 4，5 に示す．式(1)の ω_R と ζ_R はそれぞれ $10.0 \times 2\pi \text{ rad/s}$ ，0.707 と選んでいる．図 4，5 では順に，(a) 台車変位 [m]，(b) 台車速度 [m/s]，(c) 振動部先端絶対加速度 [m/s^2]，(d) 作業者操作力 [N]（前報図 1

Fig. 4 Simulation result

(w/ impedance control, disturbance observer, reaction force control and disturbance accommodating optimal control)

Fig. 5 Simulation result

(w/ impedance control, disturbance observer, reaction force control and **frequency-shaped** disturbance accommodating optimal control)

1 (d)を再掲) , (e) 外乱オブザーバによる推定外乱力 [N], (f) 台車モータの制御入力電圧 [V], (g) 振動制御用アクチュエータのスライダの台車に対する相対変位 [m] (ストローク制約 ± 25.0 mm) , (h)振動制御用アクチュエータの制御入力電圧 [V]をそれぞれ示している。

図4と5で始めに両者の土台モータの制御入力電圧(f)を比較すると、ともに台車低速時にチャタリングを発生している。低速時でない場合にはこの影響が見られないので作業者の台車操作にはあまり影響しない。しかしながら、振動制御入力(h)を比較すると図4(h)が大きなチャタリングを発生しており、このままでは搬送される構造物のスピルオーバー不安定を招いたり、微細構造物や危険物の場合、破損や事故の原因につながることも考えられる。すなわち、振動制御への影響は無視できない。この原因は、台車における固体摩擦に起因する高周波数帯域での影響が、前報の制御系ではフィードバックされて振動制御入力に含まれることによる。ところが、図5(h)では周波数成形(高域遮断特性)によりチャタリングを防ぎ、なめらかな振動制御が実現できている。すなわち、本ノートの制御系では周波数成形によりその影響が絶縁されている。この改善によって、台車操作と振動制御の両者とも前報なみの性能を維持しながら、さらに安全に搬送することが可能である。

4. おわりに

本ノートでは、著者らの前報(1)が人による機械構造物の搬送に着目し、ロバストなアシストを実現するための制御系設計法を提案していたことを踏まえ、搬送運動に極めて大きな非線形摩擦の影響など、何らかの高周波数帯域での外乱が発生した場合にその振動制御への影響を絶縁する目的で、前報の外乱包含最適制御を、高周波数帯域遮断特性を持たせた周波数成形外乱包含最適制御に取り替える改善策について示した。本改善策により、搬送する構造物のスピルオーバー不安定を避けることのみならず、微細な構造物の搬送や危険物の搬送に対する安全性、信頼性を増した制御が可能となる。

最後に、本ノートのシミュレーション実施においては、名古屋大学工学部平成22年度卒業生 林 準也氏の研究成果を参考にさせていただいたことを記すとともに、本ノートの内容の基礎となった前報の共著者各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 原進, 林準也, 櫛田陽平, 山田陽滋, 森田良文, “構造的な不確かさと作業者への振動の影響を考慮した柔軟構造物搬送のためのロバストアシスト”, 日本機械学会論文集C編, Vol.78, No.785 (2012), pp.163-175.
- (2) 原進, 櫛田陽平, 山田陽滋, 藤本勲, 森田良文, “パワーアシスト搬送を考慮した柔軟構造物の振動制御”, 日本機械学会論文集C編, Vol.76, No.768 (2010), pp.2094-2101.
- (3) 原進, 吉田和夫, “周波数成形時変評価関数を用いた柔軟構造物の非定常ロバスト制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.7 (1996), pp.985-992.
- (4) 木田隆, 池田雅夫, 山口功, “高域遮断特性をもたせた最適レギュレータとその大型宇宙構造物の制御への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.4 (1989), pp.448-454.