

## 状態推定に基づく協調運搬システムのアシスト制御

影山侑輝（富山県立大学）・中田智大（富山県立大学）  
大倉裕貴（富山県立大学）・小島千昭（富山県立大学）

## 1 はじめに

本研究では、人が加えた力を汲み取り運搬の補助を行う協調運搬システムの設計を目指す。その際に、人が物体に加えた力は直接計測できない状況が考えられる。この状況下において物体の位置や速度などの値から推定する状態推定器を外乱オブザーバ[1]によって設計する。また、人が加えた入力をロボットが調整するアシスト制御の設計を行う。

## 2 問題設定

人とロボットによる協調運搬システムの状態空間モデルを作成するために、本研究で扱う問題設定について述べる。

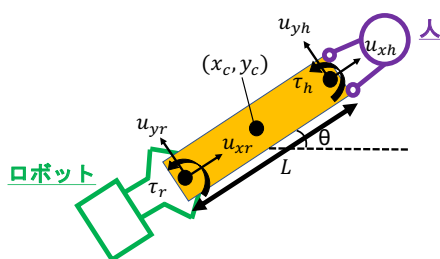


図1: 人とロボットが把持したときに働く力・トルク

文献[2]を参考に、人とロボットが物体の両端を把持し、地面に対して水平方向に動かす状況を考える。図1は、上から見下ろした状態を表している。 $M$ は物体の質量、 $J$ は物体の重心周りの慣性モーメント、 $L$ は物体の長さ、 $[x_c(t), y_c(t)]$ は物体の重心の位置、 $\theta(t)$ は物体の回転角度、 $u_h(t) := [u_{xh}(t), u_{yh}(t), \tau_h(t)]^T$ は人が物体に加える力およびトルク、 $u_r(t) := [u_{xr}(t), u_{yr}(t), \tau_r(t)]^T$ はロボットが物体に加える力およびトルクを表す。図1の関係から、人とロボットによる運動方程式が $x$ 方向、 $y$ 方向と $\theta$ 方向それぞれに対して与えられる。また、物体の状態 $x_o(t) \in \mathbb{R}^6$ を $x_o(t) := [x_c(t), y_c(t), \theta(t), \dot{x}_c(t), \dot{y}_c(t), \dot{\theta}(t)]^T$ とおき、運動方程式から状態空間モデルを作成する。

## 3 外乱オブザーバによるアシスト制御入力の設計

本節では、人が加えた未知な制御入力 $u_h(t)$ を物体の状態の変化から推定するために、文献[1]の方法を利用して外乱オブザーバを設計する。

外乱オブザーバの設計にあたって、人が加える制御入力の時間変化を0と仮定し、 $\dot{u}_h(t) = 0$ とおく。この式は、人

の操作に時間がかかると仮定し、概ねオブザーバが人の実際の操作に追従することを意味する。

$u_h(t)$ を含む状態 $x(t) := [x_o^T(t), u_h^T(t)]^T$ と、その状態の推定値 $\hat{x}(t) := [\hat{x}_o^T(t), \hat{u}_h^T(t)]^T$ を定める。外乱オブザーバによる状態の推定値 $\hat{x}(t)$ を含む拡張させたオブザーバを併合した全体のシステムは、

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 \\ -\bar{L}_d \bar{C} & \bar{A} + \bar{L}_d \bar{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B} \\ \bar{B} \end{bmatrix} u_r(t) \quad (1)$$

によって書き直される。ただし、 $\bar{L}_d$ はオブザーバゲイン、 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ はシステムの構造から決まる定数行列である。この(1)式の状態方程式から得られる人が加える力の推定値 $\hat{u}_h(t)$ を利用して、直接力の値が得られない状況でもアシスト制御が行える。

ロボットが物体に加える制御入力 $u_r(t)$ は、この推定値 $\hat{u}_h(t)$ を利用して、

$$u_r(t) = (B_r^T B_r)^{-1} B_r^T (B_h F_a - B_h) \hat{u}_h(t) \quad (2)$$

と設計する。ただし、 $B_r, B_h$ はシステムの運動方程式から決まる定数行列、 $F_a \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はロボットによる協調運搬のアシスト量を調整するゲイン行列である。(2)式の制御入力を用いることで、たとえば、 $F_a$ を

$$F_a = \begin{bmatrix} f_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & f_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & f_{a\tau} \end{bmatrix}$$

のように設計した場合、人が物体に加えた力 $u_h(t) := [u_{xh}(t), u_{yh}(t), \tau_h(t)]^T$ に対して、 $x$ 方向に $f_{ax}$ 倍、 $y$ 方向に $f_{ay}$ 倍、 $\theta$ 方向に $f_{a\tau}$ 倍された力が物体に加えられる。

人が物体に加える入力についてのモデル化や、カルマンフィルタを用いた状態推定、得られたアシスト制御によるシミュレーションなども今後検討していく。

本研究の一部はJSPS科研費20K14767の助成を受けたものです。謝意申し上げます。

## 参考文献

- [1] 大西公平：外乱オブザーバによるロボスタ・モーションコントロール，日本ロボット学会誌，第11巻第4号，pp.486-493 (1993)
- [2] 田窪朋仁，荒井裕彦，谷江和雄，林原靖男：人とロボットによる長尺物の協調運搬（仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法），日本機械学会論文集（C編），第66巻第648号，pp.207-214 (2000)