

人間と移動マニピュレータの干渉を考慮した協調動作

80123743 山中 絵理

指導教員 村上 俊之

1 緒論

本論文では、マニピュレータアームを2輪台車に搭載した移動マニピュレータを用いて、人間とロボットによる協調動作の実現を目的とする。人間とロボットが共存するような環境においては、ロボットに高い安全性が要求される。そこで本研究では、人間とロボットの間に仮想インピーダンスを設定し安全性を確保する。また、人間によって加えられた操作力を台車とマニピュレータにそれぞれ力指令として与え、各システムの等価質量に応じて台車へのインピーダンス入力を決定する。これにより、台車の追従性能やマニピュレータの可操作性を考慮した台車への仮想的な力入力を行うことができ、移動マニピュレータによる滑らかな動作が実現できる。さらに本研究では、初めに与えられた目的地に対する位置指令と、後から入力される人間の操作による動作を満たすようなロボット制御を提案する。

2 移動マニピュレータの動作決定

本システムでは移動マニピュレータについてサブシステム分解制御を行っている。マニピュレータの加速度参照値 ${}^v\ddot{\mathbf{x}}_m^{ref}$ は次式で与えられる。

$${}^v\ddot{\mathbf{x}}_m^{ref} = \mathbf{M}_m^{-1} \{ \mathbf{K}_p^m ({}^v\mathbf{x}_m^{cmd} - {}^v\mathbf{x}_m^{res}) + \mathbf{K}_v^m ({}^v\dot{\mathbf{x}}_m^{cmd} - {}^v\dot{\mathbf{x}}_m^{res}) + \mathbf{F}_{ext} \} \quad (1)$$

また、台車部では、手先に加えられた操作力 $\mathbf{F}_{ext}$ を台車の並進方向 F_v と回転方向 N_v に分配する。台車への仮想力は次のように表せる。

$$\mathbf{F}_v^{ref} = \begin{bmatrix} F_v \\ N_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)式より、台車の加速度参照値 ${}^w\ddot{\mathbf{x}}_v^{ref}$ を得る。

$${}^w\ddot{\mathbf{x}}_v^{ref} = \mathbf{K}_{vt}^v ({}^w\dot{\mathbf{x}}_v^{cmd} - {}^w\dot{\mathbf{x}}_v^{res}) + \frac{\mathbf{F}_v^{ref}}{M_v} \quad (3)$$

ここで、台車の等価質量 M_v を用いて台車にかかる仮想力の制御を行う。マニピュレータの等価質量行列 $\mathbf{M}_m$ は、ヤコビ行列 $\mathbf{J}_{aco}^m$ と動力学によって求めたノミナル慣性行列 $\mathbf{I}_n^m$ を用いて、(4)式のように表せる。

$$\mathbf{M}_m = (\mathbf{J}_{aco}^m \mathbf{I}_n^m \mathbf{J}_{aco}^{mT})^{-1} \quad (4)$$

マニピュレータの初期姿勢があらゆる方向に動きやすい位置だと仮定し、台車の等価質量行列 $\mathbf{M}_v$ がもっとも小さくなる点をその基準位置 L_{in} として、台車のヤコビ行列 $\mathbf{J}_{aco}^v$ を求め、この $\mathbf{J}_{aco}^v$ とノミナル慣性行列 $\mathbf{I}_n^v$ を用いて、台車の等価質量行列 M_v は(5)式のように表せる。

$$\mathbf{M}_v = (\mathbf{J}_{aco}^v \mathbf{I}_n^v \mathbf{J}_{aco}^{vT})^{-1} \quad (5)$$

等価質量行列は質量が各成分別々に求められるため、あらゆる方向に対する評価指標として用いることができない。そこでX軸とY軸の対角成分の積をとり、台車の等価質量 M_v を次のように表す。

$$M_v = \frac{\sqrt{M_{v11} \cdot M_{v22}}}{\sqrt{M_{m11} \cdot M_{m22}}} \quad (6)$$

(6)式によって計算された台車の等価質量は、マニピュレータの等価質量が小さいときに相対的に大きくなり、ロボットはマニピュレータ主体の動作を行う。一方、マニピュレータの等価質量が大きいたまは台車の等価質量は小さくなり、台車とマニピュレータの両方の動きによってロボットの手先の動作が決定される。このように等価質量に基づきマニピュレータに対する台車の動きやすさを拘束した上で、外部操作力に応じた移動マニピュレータの動作指令を生成することによって、人間の操作入力に対して柔軟に対応することが可能な移動マニピュレータ全体の動作制御が実現できる。

3 台車コントローラの構成

本研究では、台車について初めに与えられた目的地に対する位置指令 ${}^w\mathbf{x}_v^{cmd}$ と、操作力によって発生した仮想的な力指令 $\mathbf{F}_v^{ref}$ を与える。この2つの指令を状況に応じて実現することによって、人間による操作とロボットに与えられた仕事の干渉を考慮した制御系を構築することができる。台車には、ポテンシャル場を用いた位置指令値を与える。目的地への引力は次式で与えられる。

$$\mathbf{F}_{po}^x = -g_x |{}^w\mathbf{x}_v^{res} - {}^w\mathbf{x}_v^{goal}| \quad (7)$$

この引力を位置指令値に直して与える。

$$f_{dir} = \sqrt{F_{po}^x \times F_{po}^x + F_{po}^y \times F_{po}^y} \quad (8)$$

$${}^w\mathbf{x}_v^{cmd} = {}^w\mathbf{x}_v^{res} + \frac{\mathbf{F}_{po}}{f_{dir}} \quad (9)$$

台車の指令値は、初めに与えられた目的地に対する位置指令と人間に与えられた操作力による力指令によって決定する。その加速度指令値は次式で表せる。

$$\begin{aligned} w\ddot{x}_v^{ref} &= K_p^v(w\dot{x}_v^{cmd} - w\dot{x}_v^{res}) \\ &+ K_v^v(w\dot{x}_v^{cmd} - w\dot{x}_v^{res}) + \frac{F_v^{ref}}{M_v} \quad (10) \end{aligned}$$

システム全体のブロック線図を図 1 に示す。

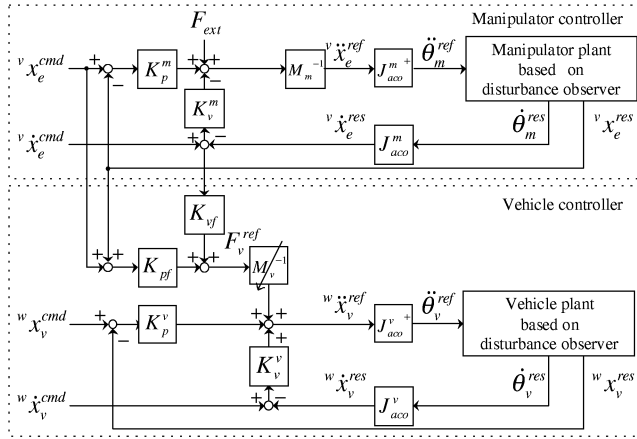


図 1: Total System

4 実験

本論文で提案した制御系の有効性を実証するため、移動マニピュレータを用いて等価質量を用いた移動マニピュレータの動作確認、位置と力指令を用いた台車の動作確認の2つの実験を行った。実験1では、マニピュレータの手先に加えられたX軸およびY軸方向の操作力によって台車が加減速していることがわかる。また、マニピュレータの操作性が台車制御系に設定された等価質量 M_v に反

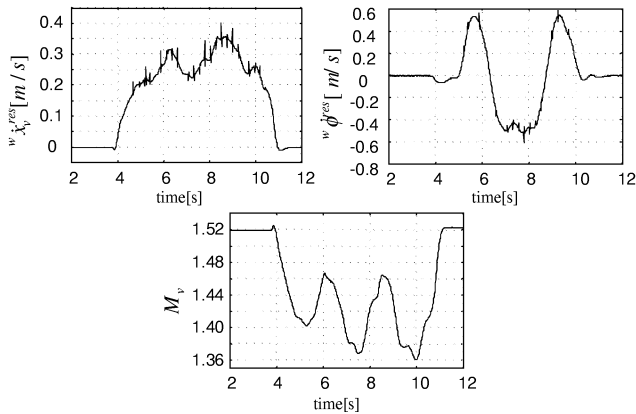


図 2: 実験1の結果

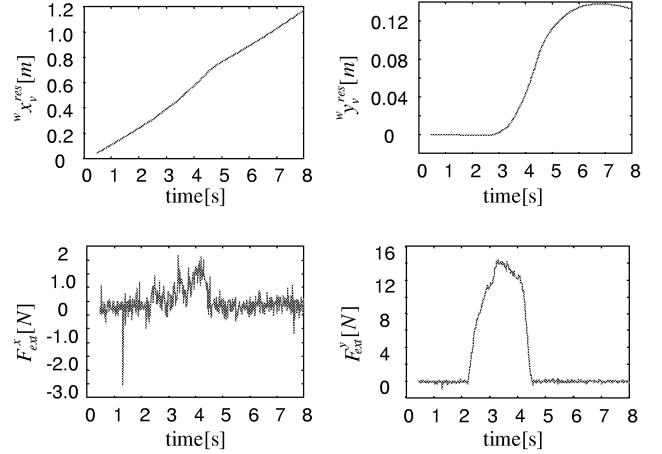


図 3: 実験2の結果

映されているため、手先の操作力の細かな動きに対しても移動マニピュレータの動作が滑らかに実現されている。

実験2では、人間による力入力によって移動マニピュレータが滑らかに動作し、最終的にはポテンシャル場を用いた位置指令値生成によって台車が目的地に導かれている。

5 結論

本論文では人間とロボットの相互作用の一手法を提案した。両者の間に仮想インピーダンスを設定し、移動マニピュレータを人間の操作に滑らかに追従させる手法を提案した。等価質量を用いて、台車とマニピュレータの操作性を考慮した手先の動作決定を行うことで、移動マニピュレータ全体の自然な動作を実現した。台車についてポテンシャル場を用いた位置指令値生成を行い、人間による操作に応じながらも最終的には目的地に達する人間とロボットの協調動作を実現した。提案する手法の有効性をシミュレーションと実機実験によって確認した。

参考文献

- [1] F.Inoue, T.Murakami, K.Ohnishi : “A Motion Control of Mobile Manipulator with External Force” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.1, No.1, pp.56–67, 1996.
- [2] T.Murakami, N.Oda, Y.Miyasaka, K.Ohnishi : “A Motion Control Strategy Based on Equivalent Mass Matrix in Multidegree-of-Freedom Manipulator” Proceedings, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.2, pp.123–130, 1995.