

押し作業における対象物安定性を考慮した移動マニピュレータの環境適応制御 Environment Adaptive Control Considering Stability of Pushed Object in Pushing Operation by Mobile Manipulator

80917418 藤本祐介 (Yusuke Fujimoto)

Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

近年の少子高齢化による介護者・労働力不足の一つの解決法として、人間の代わりに車椅子や台車を搬送するロボットが考えられる。ロボットによる押し作業の従来研究は、その多くが追従性のみに焦点を当てていた。しかし、人間環境は段差や凸凹道など様々な不整地が存在するため、追従性だけでなく、安定性、環境適応性を含む三つの要素が必要となる。

そこで、本研究では押し作業における三要素の実現を目指し、二つの提案を行う。一つ目の提案は、追従性と安定性の両立である。本研究では、対象物が有する非ホロノミック拘束を考慮した新たな安定性向上手法を提案し、対象物追従性と安定性の両立を実現する。二つ目の提案は、段差環境への適応性向上である。人間環境には多くの段差が存在するが、車椅子は1cmの段差ですら乗り越えることが難しい。本研究では、車椅子のピッチ角を制御し、段差を乗り越える手法を提案する。本手法を前輪に上下可動機構等を備えたロボットに適用することで、車椅子、ロボット共に段差を乗り越えることができる。以上、二つの提案を組み合わせることで、不整地環境においても安定した押し作業を行うことが可能となる。

2 モデリング

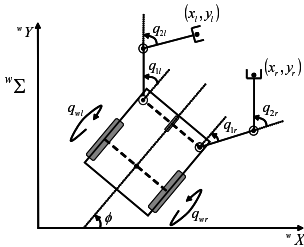


図 1: 二次元動作型
移動マニピュレータ

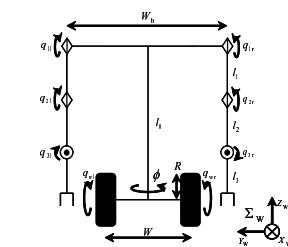


図 2: 三次元動作型
移動マニピュレータ

本研究で用いる移動マニピュレータのモデルを図 1, 図 2 に示す。提案 1 では手先鉛直方向の自由度を用いないため、図 1 のようにシンプルな二次元動作型移動マニピュレータを用いる。二次元動作型移動マニピュレータの一般化座標 $q = [q_{wr} \ q_{wl} \ q_{1r} \ q_{2r} \ q_{1l} \ q_{2l}]^T$ と手先位置 $x = [x_r \ y_r \ x_l \ y_l]^T$ の順運動学と逆運動学は以下のように表される。

$$\ddot{x} = J\dot{q} \quad (1)$$

$$\dot{q} = J_W^+ \ddot{x} + (I - J_W^+ J)\dot{q}^{null} \quad (2)$$

$$J_W^+ = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T)^{-1} \quad (3)$$

(1) 式において微小項は無視した。(2) 式の \dot{q}^{null} は零空間入力を表す。(1) 式~(3) 式において、一般化座標を $q = [q_{wr} \ q_{wl} \ q_{1r} \ q_{2r} \ q_{3r} \ q_{1l} \ q_{2l} \ q_{3l}]^T$ 、手先位置を $x = [x_r \ y_r \ z_r \ x_l \ y_l \ z_l]^T$ とすることで、三次元動作型移動マニピュレータの運動学も同様に表すことができる。

3 制御系設計

3.1 提案 1 の制御系設計

まず、押し作業における従来の安定性向上手法であるコンプライアンス制御について述べる。仮想インピーダンスモデルを

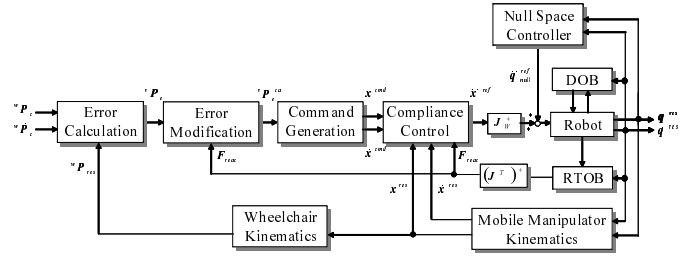


図 3: 提案 1 のブロック線図

以下に示す。

$$M_c \ddot{x}_c + D_c \dot{x}_c + K_c x_c = F_{reac} \quad (4)$$

M_c, D_c, K_c はそれぞれ仮想質量, 仮想ダンパ定数, 仮想バネ定数を, $\ddot{x}_c, \dot{x}_c, x_c$ はコンプライアンス指令値を, F_{reac} は推定反力を表している。(4) 式より, 手先加速度参照値が以下のように得られる。

$$\ddot{x}^{ref} = K_p(x^{cmd} - x^{res} - x_c) + K_v(\dot{x}^{cmd} - \dot{x}^{res} - \dot{x}_c) - \ddot{x}_c \quad (5)$$

コンプライアンス制御を用いることで、不整地等から対象物に加わる力に対して柔らかい制御を行うことが可能となり、対象物安定性が向上する。

しかし、上記の手法は対象物の有する非ホロノミック拘束を考慮しておらず、正確な追従ができない場合が多々ある。そこで、非ホロノミック拘束を考慮した指令値生成法について述べる。非ホロノミック拘束を考慮した対象物進行方向、旋回方向の速度参照値 $v_{vref}, v_{\phi ref}$ は以下のように決定される。

$$\begin{aligned} v_{ref} &= \begin{pmatrix} v_{vref} & v_{\phi ref} \end{pmatrix}^T \\ &= \begin{pmatrix} v_c \cos v\phi_e + K_x v x_e \\ v_{\phi c} + v_c (K_y v y_e + K_\phi \sin v\phi_e) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $v x_e, v y_e, v\phi_e$ は対象物座標系から見た指令値と応答値の偏差、 $v v_c, v_{\phi c}$ は対象物進行方向、旋回方向の指令値、 K_x, K_y, K_ϕ はゲインである。(6) 式の参照値を手先指令値に変換してコンプライアンス制御に適用すると、コンプライアンス制御による振動的な応答により、上式から生成する指令値自体が振動的になってしまい、対象物の振動が増大してしまう。このため、以下のように偏差を修正し、許容誤差を導入する。

$$v P_e^{ca} = \begin{pmatrix} v x_e^{ca} \\ v y_e^{ca} \\ v \phi_e^{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+K_{xca} v F_x^2} v x_e \\ v y_e \\ v \phi_e \end{pmatrix} \quad (7)$$

K_{xca} はゲイン、 $v F_x$ は対象物進行方向の手先反力である。(7) 式のように、許容誤差を導入することで、対象物に大きな力が加わった時のみ追従のロバスト性を低減させることができる。(7) 式の修正誤差を (6) 式に適用して求めた対象物速度参照値を手先速度に変換し、これを指令値としてコンプライアンス制御に適用する。これにより、非ホロノミックの拘束を考慮した安定性向上制御を実現する。提案 1 のブロック線図を図 3 に示す。

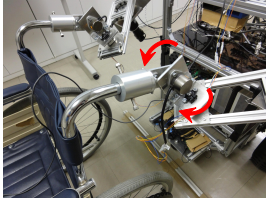


図 4: 手先機構

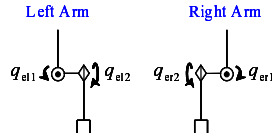


図 5: 手先モデル

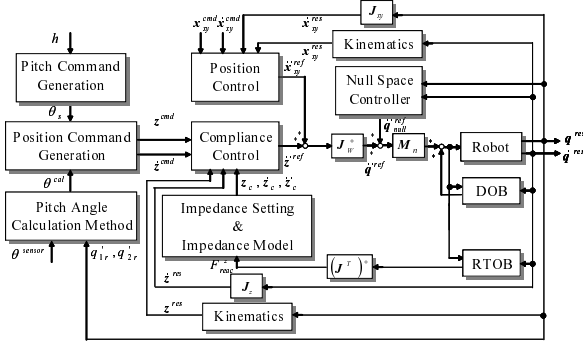


図 6: 提案 2 のブロック線図

3.2 提案 2 の制御系設計

提案 2 では、段差の位置と高さはカメラ等によって、あらかじめ得られていると仮定する。まず、段差乗り越えのために図 4, 図 5 のように各アームに二つの受動関節を含む機構を手先に取り付ける。この機構により、車椅子の姿勢変動に合わせて柔軟に手先が動作するため、移動マニピュレータの手先位置を決めるだけで簡単に車椅子のピッチ角を制御することができる。

次に、手先位置指令値生成法について述べる。必要ピッチ角 θ_s を以下のように定義する。

$$\theta_s = \arcsin\left(\frac{h + h'}{l_w}\right) \quad (8)$$

h は段差高さ、 h' は高さ余裕、 l_w は車椅子のホイールベースである。また、受動関節に取り付けられた角度センサから、車椅子ピッチ角を以下のように計算できる。

$$\theta^{cal} = \theta_{init}^{sensor} - \theta^{sensor} - (q'_{1r} + q'_{2r}) \quad (9)$$

θ_{init}^{sensor} は初期状態の角度センサの計測値、 θ^{sensor} は角度センサの計測値、 q'_{1r} 、 q'_{2r} はアーム第一、第二関節の角度変動量である。車椅子のピッチ角を (8) 式の必要ピッチ角に制御するために、車椅子前輪を上げるための指令値 z_f^{cmd} を以下のように設定する。

$$z_f^{cmd} = \begin{cases} z^{init} - z't & (\theta^{cal} < \theta_s) \\ z_s & (\theta^{cal} = \theta_s) \end{cases} \quad (10)$$

z^{init} は手先鉛直初期位置、 z' は任意の速度、 t は時間、 z_s は必要手先鉛直位置を表している。(10) 式の指令値に、他の部分を補完することで、段差乗り越え全体の指令値を設定する。

以上で求めた指令値をコンプライアンス制御に適用する。前輪段差乗り越えは正確な制御が、後輪段差乗り越えは柔らかい制御が要求されているため、コンプライアンス制御の固有各周波数 ω_{fz} を切り替えることでこれを実現する。つまり、車椅子の前輪段差乗り越えの時は ω_{fz} の値を大きく、後輪段差乗り越えの時は ω_{fz} の値を小さく設定する。提案 2 のブロック線図を図 6 に示す。

4 実験

4.1 提案 1 の有効性検証

実験の概観を図 7 に示す。対象物安定性評価のために、車椅子に振動物体と加速度センサを設置した。また、車椅子の軌道

上に、0.5cm の段差を設置し、車椅子に外乱を与えた。実験は PD ベースとコンプライアンスベースの二つの場合で行った。実験結果を図 8 ~ 図 10 に示す。提案手法を用いることで、車椅子が段差を通過する時、振動物体の振動、車椅子の上下加速度共に抑制されていることがわかる。また、非ホロノミックを有する車椅子が目標軌道を正確に追従することができた。



図 7: 実験の概観

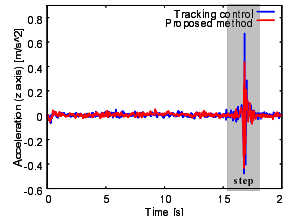


図 9: 鉛直加速度応答

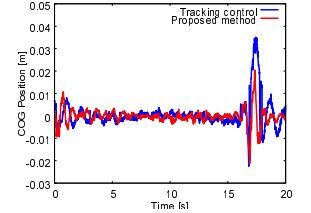


図 8: 振動物体重心位置応答

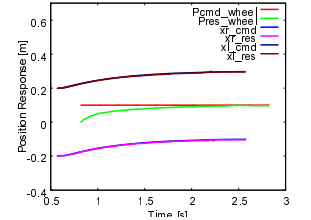


図 10: 車椅子と手先の軌跡

4.2 提案 2 の有効性検証

車椅子に傾斜センサを設置し、ピッチ角応答を測定した。目標軌道を直線軌道とし、軌道に普通に押したのでは乗り越えられない 3cm の段差を設置した。実験結果を図 11, 図 12 に示す。1 秒 ~ 3 秒で前輪を上げ、4 秒から 7 秒で前進し、8 秒から 10 秒で前輪を下げ、再び前進して 12 秒付近で後輪が段差を乗り越えた。図 12 より、車椅子ピッチ角計算値が正確に計算されており、車椅子ピッチ角が必要ピッチ角まで正確に制御されていることがわかる。

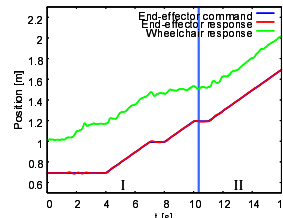


図 11: 車椅子と手先の位置

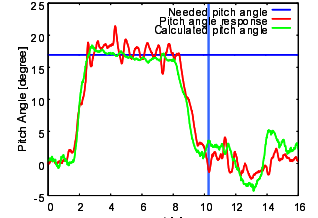


図 12: 車椅子ピッチ角

5 結論

本研究では、人間環境における押し作業に必要な三要素を実現するために、二つの提案を行った。一つ目の提案では、対象物の追従性と安定性を両立し、二つ目の提案では段差環境への適応を実現した。以上、二つの提案を組み合わせることで、人間環境のような不整地環境においても安定した押し作業を行うことが可能となる。実験により、本提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] Yusuke Fujimoto and Toshiyuki Murakami: "An Improvement Method of Compliance Control in Pushing Operation by Mobile Manipulator", The 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2010), pp. 1447-1452, Nov, 2010
- [2] Yusuke Fujimoto and Toshiyuki Murakami: "Step Climbing Control in Pushing Operation by Mobile Manipulator", The 8th edition of France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, Nov, 2010