

移動マニピュレータによる車椅子押し作業のための一実現法

A Strategy for Pushing Motion of Wheelchair by Mobile Manipulator

80718119 渡辺勇人 (Yuto Watanabe) Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

本研究では、移動マニピュレータによる車椅子の押し作業のための一実現法の提案を目的とする。研究背景として、近年ますます深刻化する少子高齢化が挙げられる。少子高齢化により、介護を必要とする高齢者が増加する一方で介護者が不足し、介護者一人ひとりの負担が増加するという問題が考えられる。この問題の解決方法の一端として、移動マニピュレータによる介護者作業代行・補助のための手法を提案する。これまでに、移動マニピュレータをテーマに扱っている研究は数多くある。移動マニピュレータによって搬送作業を行った研究 [1] や、複数台の移動マニピュレータの協調作業の研究などがある。しかし、被移動物体に人が乗り、その乗り心地に関して考慮したものがない。そこで本研究の具体的な目的は、車椅子搭乗者の乗り心地を考慮した押し作業の実現とする。また車椅子が所望の位置・軌道に到達できるための車椅子軌道追従の実現も目的とする。この二つ目的についてそれぞれの手法を提案し、実験により有効性を確認する。

2 実験システムのモデル化



図 1: 外観図

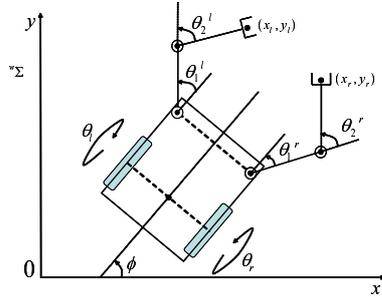


図 2: モデル図

本章では、本研究で用いられる移動マニピュレータのモデル化を行う。この移動マニピュレータの外観を図 1 に示す。移動マニピュレータは、移動プラットフォームとして同軸二輪独立駆動型の機構と、二自由度のマニピュレータを二つ有している。本研究では、移動プラットフォームとマニピュレータをひとつのシステムとして考え、移動マニピュレータとしてモデル化する。移動マニピュレータは $x-y$ 平面上を移動する。この時、移動マニピュレータのモデルを移動マニピュレータ方向角 ϕ を含め、図 2 に示す。図 2 において、 $\theta = (\theta_r, \theta_l, \theta_1^r, \theta_2^r, \theta_1^l, \theta_2^l)^T \in R^n (n=6)$ は関節角ベクトルを、 $x = (x_r, y_r, x_l, y_l)^T \in R^m (m=4)$ は作業空間における位置ベクトルを表す。移動マニピュレータの運動学は (1) 式のように表される。ここで、 $J_{aco} \in R^{m \times n}$ は速度と角速度の関係を表すヤコビ行列である。

$$\dot{x} = J_{aco} \dot{\theta} \quad (1)$$

(1) 式の両辺を時間微分することで加速度次元の関係式を得る。ただし、ヤコビ行列の時間微分の項の影響は、十分小さいので無視することができる。さらに、ヤコビ行列の擬似逆行列 $J_{aco}^+ = J_{aco}^T (J_{aco} J_{aco}^T)^{-1} \in R^{n \times m}$ を用い、作業空間の加

速度参照値 \ddot{x}^{ref} から、関節空間の加速度参照値 $\ddot{\theta}^{ref}$ は求められる。その逆運動学方程式は (2) 式のように表される。

$$\ddot{\theta} = J_{aco}^+ \ddot{x} + (I - J_{aco}^+ J_{aco}) \eta \quad (2)$$

(2) 式の右辺第二項において、 $\eta \in R^n$ は零空間への任意の入力ベクトルを表す。

さらに、移動マニピュレータの動力学について述べる。ラグランジュ方程式を解くことにより、動力学方程式は (3) 式になる。

$$M(\theta) \ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (3)$$

ここで、 $\tau \in R^n$ は各関節に働く入力トルクを、 $M(\theta) \in R^{n \times n}$ は慣性行列を、 $H(\theta, \dot{\theta}) \in R^n$ は遠心力・コリオリ力の項をそれぞれ示す。

3 制御系の設計

3.1 乗り心地を考慮した押し作業

「乗り心地を考慮した押し作業」を本研究では、車椅子搭乗物体の振動抑制をしつつ押し作業を行う事と定義する。移動マニピュレータが車椅子の押し作業を行う際、移動マニピュレータは車椅子側から反力を受ける。車椅子搭乗物体が振動した場合、その影響がマニピュレータの手先に車椅子からの反力として作用する。反力は反カトルク推定オブザーバにより得る。この反力に対して所望のコンプライアンス特性を実現しつつ、行うことができるコンプライアンス制御を適用し、振動抑制を実現する。

所望のインピーダンス特性 $M_c \cdot D_c \cdot K_c$ で構成される (4) 式の仮想インピーダンスモデルを用いて、推定した反力 F_{reac} を位置・速度・加速度の指令値 $(x_c, \dot{x}_c, \ddot{x}_c)$ に変換する。生成された指令値を位置制御系に入力することにより所望のコンプライアンス動作を実現でき、位置制御の応答特性を独立に設計することができる。

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

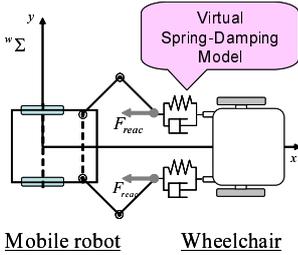
反力 F_{reac} から生成された位置・速度・加速度の指令値 $(x_c, \dot{x}_c, \ddot{x}_c)$ を含め、作業空間における移動マニピュレータの手先効果器の加速度参照値 \ddot{x}^{ref} は (5) 式のように生成される。

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

ここで、添え字は cmd は指令値を、 res は応答値を、 c はコンプライアンス制御による指令値を各々表す。また、 K_p および K_v は位置ゲインおよび速度ゲインを表す。

3.2 車椅子軌道追従

押し作業によって車椅子を目的地へ搬送するため、押し作業を行う移動マニピュレータをなめらかに軌道追従させる必要がある。この軌道追従制御は Kanayama らの手法 [2] を基としており、目標位置を固定せず、時間関数として与えることで非ホロ



Mobile robot Wheelchair

図 3: コンプライアンス制御

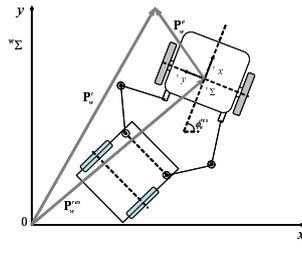


図 4: 車椅子軌道追従制御

ノミック拘束を有する車椅子の漸近安定化が実現できるものである。この時、漸近安定は Lyapunov 関数を用いて保証される。車椅子の位置応答値を P_w^{res} , 位置指令値を P_w^c とすると, 指令位置と現在位置の偏差 P_w^e は, (6) 式のように示される。Fig. 4 に位置偏差の関係を表した図を示す。

$$P_w^e = \begin{pmatrix} x_w^e & y_w^e & \phi_w^e \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \cos \phi_w^{res} & \sin \phi_w^{res} & 0 \\ -\sin \phi_w^{res} & \cos \phi_w^{res} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (P_w^c - P_w^{res}) \quad (6)$$

ここで $P_w^c = P_w^{res}$ のとき, 車椅子は位置偏差なく軌道に追従できているといえる。次に, \dot{P}_w^e を求めると以下ようになる。

$$\dot{P}_w^e = \begin{pmatrix} \dot{x}_w^e & \dot{y}_w^e & \dot{\phi}_w^e \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} y_w^e \dot{\phi}_w^e - v_w + v_w^c \cos \phi_w^e \\ -x_w^e \dot{\phi}_w^e + v_w^c \sin \phi_w^e \\ \dot{\phi}_w^e - \dot{\phi}_w \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで, (8) 式のような制御入力を定義する。なお, K_x, K_y, K_ϕ は正の定数である。

$$q = \begin{pmatrix} v_w \\ \dot{\phi}_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_w^c \cos \phi_w^e + K_x x_w^e \\ \dot{\phi}_w^c + v_w^c (K_y y_w^e + K_\phi \sin \phi_w^e) \end{pmatrix} \quad (8)$$

この制御入力 (8) 式により, \dot{P}_w^e は (9) 式のように示せる。

$$\dot{P}_w^e = \begin{pmatrix} \dot{x}_w^e & \dot{y}_w^e & \dot{\phi}_w^e \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} y_w^e (\dot{\phi}_w^c + v_w^c (K_y y_w^e + K_\phi \sin \phi_w^e)) - K_x x_w^e \\ -x_w^e (\dot{\phi}_w^c + v_w^c (K_y y_w^e + K_\phi \sin \phi_w^e)) + v_w^c \sin \phi_w^e \\ -v_w^c (K_y y_w^e + K_\phi \sin \phi_w^e) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Lyapunov 関数の候補として, 以下の V を定義する。

$$V = \frac{1}{2}(x_w^e{}^2 + y_w^e{}^2) + (1 - \cos \phi_w^e)/K_y \quad (10)$$

$V \geq 0$ であることは明らかである。 V の時間微分 \dot{V} は, (8) 式を用いることで (11) 式のように示される。

$$\dot{V} = \dot{x}_w^e x_w^e + \dot{y}_w^e y_w^e + \dot{\phi}_w^e \sin \phi_w^e / K_y = -K_x x_w^e{}^2 - v_w^c K_\phi / K_y \sin \phi_w^e{}^2 \leq 0 \quad (11)$$

(8) 式の車椅子の速度指令値を実現するための手先効果器の速度指令値は (12) ~ (15) 式によって生成される。

$$\dot{x}_r^{cmd} = v_w \cos \phi_w^{res} + \dot{\phi}_w \left(\frac{W_w}{2} \cos \phi_w^{res} + L_w \sin \phi_w^{res} \right) \quad (12)$$

$$\dot{y}_r^{cmd} = v_w \sin \phi_w^{res} + \dot{\phi}_w \left(\frac{W_w}{2} \sin \phi_w^{res} - L_w \cos \phi_w^{res} \right) \quad (13)$$

$$\dot{x}_l^{cmd} = v_w \cos \phi_w^{res} + \dot{\phi}_w \left(-\frac{W_w}{2} \cos \phi_w^{res} + L_w \sin \phi_w^{res} \right) \quad (14)$$

$$\dot{y}_l^{cmd} = v_w \sin \phi_w^{res} + \dot{\phi}_w \left(-\frac{W_w}{2} \sin \phi_w^{res} - L_w \cos \phi_w^{res} \right) \quad (15)$$

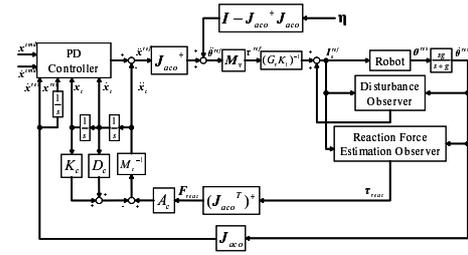


図 5: 乗り心地を考慮した押し作業のための制御

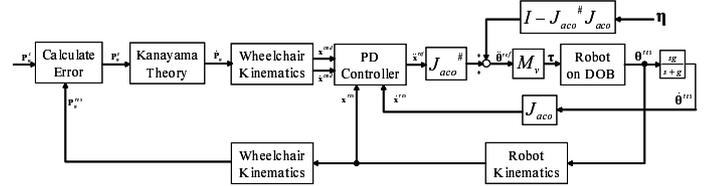


図 6: 車椅子軌道追従制御

3.3 制御系

車椅子搭乗者の乗り心地を考慮した押し作業のための制御系を図 5 に, 車椅子軌道追従制御系を図 6 にそれぞれ示す。

4 実験

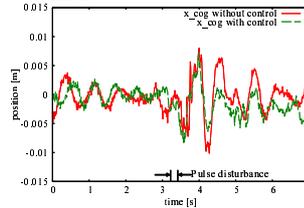


図 7: 振動物体の変位

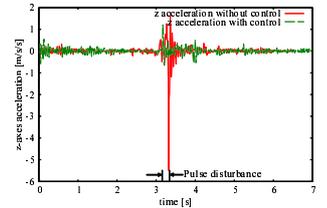


図 8: 上下方向加速度

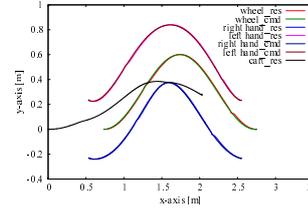


図 9: 正弦波状軌道追従

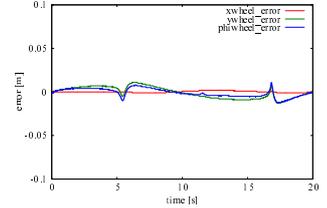


図 10: 追従偏差

提案手法の有効性を確認するため, 振動物体を乗せた車椅子押し作業実験と, 軌道追従実験を行った。乗り心地を考慮した押し作業の評価として, 振動物体の車椅子座標系における変位と車椅子の上下方向に生じる加速度を図 7, 8 にそれぞれ示す。また, 軌道追従の評価として, 指令軌道に対する絶対座標系における車椅子および移動マニピュレータの位置応答と位置偏差を図 9, 10 にそれぞれ示す。

5 結論

押し作業を行っている際, 車椅子にパルス外乱を与えた。この時, 図 7 のように車椅子上の振動物体の振動を, 提案手法により振動を抑制できた。また, 図 8 に示すように提案手法により上下方向の加速度を抑制することができた。以上のことから, 乗り心地を考慮した押し作業の有効性を実験により確認した。また, 図 9, 10 に示すように, 車椅子は所望の軌道に追従していることがわかり, 軌道追従制御の有効性を実験により確認した。

参考文献

- [1] T.Jindong, X.Ning and W.Yuechao "Integrated Task Planning and Control for Mobile Manipulators" *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* pp. 1572 - 1577, 2002
- [2] Y.Kanayama, Y.Kimura, F.Miyazaki and T.Noguchi "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot" *Proc. IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 384-389, 1990