

受動関節外乱を考慮した2輪駆動型移動マニピュレータの軌道追従制御 A Trajectory Tracking Control Considering the Passive Joint disturbance by Two-Wheel Mobile Manipulator

80815124 池田哲朗 (Tetsuro Ikeda) Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

近年、製造現場以外の分野で活躍するパートナーロボットが多く研究開発されている。その中でも、移動マニピュレータは、機動性と作業性を兼ね備えており、運搬・操作などの作業を行うのに有効である。さらに、屋内の狭い環境下や段差のある環境下において機動性を向上させるため、キャストを持たない同軸2輪車を移動機構とした移動マニピュレータを本研究の対象とする。上述の移動機構を持つ移動マニピュレータの研究は数多くなされている。それらは、移動マニピュレータの姿勢安定化や軌道追従、その他の制御を実現してきた。しかし、多くの場合が低速時における安定性しか想定しておらず、高速時における姿勢安定化と軌道追従の性能を検証していない。そこで本研究では、2輪駆動型移動マニピュレータの姿勢を安定化しつつ、マニピュレータ先端によって高速かつ正確な軌道追従を行うことを目的とする。そのために、車輪部分とマニピュレータ部分を分離して、独立な2つのサブシステムとみなし、制御系を構成する。車輪部分では、受動関節外乱 [1] を考慮した姿勢安定化制御手法を提案する。また、車輪部分とマニピュレータ部分では、kanayama 手法 [2] に基づいた軌道追従制御手法を提案する。最後にシミュレーションと実験により、提案手法の有効性を確認する。

2 モデリング



図 1: 実験機

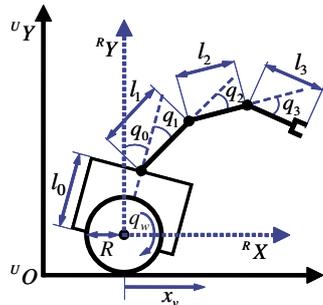


図 2: 側面図

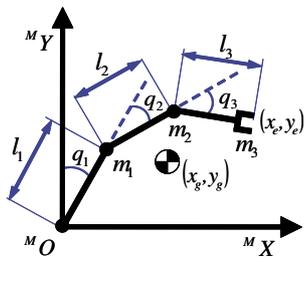


図 3: マニピュレータ座標

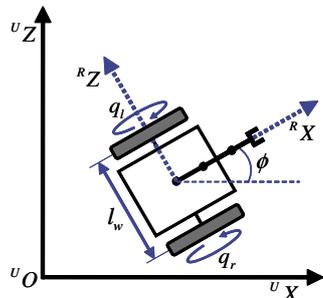


図 4: 車輪座標

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。実験で使用した移動マニピュレータの写真を図 1 に示す。また、移動マニピュレータの側面図を図 2 に示す。この移動マニピュレータは、同軸2輪駆動型の移動機構と3リンクの冗長マニピュレータを有している。上部3リンク (q_1, q_2, q_3)

と車輪 (q_r, q_l) はモータによって直接駆動されるが、車体の傾き (q_0) は受動関節であるため、直接駆動することが不可能である。

本研究では、ロボットを車輪部分とマニピュレータ部分に分けて制御系を設計する。受動関節を除いたマニピュレータ部分の側面図を図 3、車輪部分の上面図を図 4 に示す。マニピュレータ部分の制御系設計では、マニピュレータの先端位置 (x_e, y_e) と重心位置 (x_g, y_g) を制御対象とし、運動学は (1) 式と (2) 式で示される。

$$\dot{x}_e = J_e \dot{q}_m \quad (1)$$

$$\dot{x}_g = J_g \dot{q}_m \quad (2)$$

ここで、 $q_m = (q_1, q_2, q_3)^T$ 、 $x_e = (x_e, y_e)^T$ 、 $x_g = (x_g, y_g)^T$ である。 J_e と J_g はヤコビ行列を表す。

車輪部分の制御系設計では、車体の並進走行距離 x_v と旋回角度 ϕ を制御対象とし、運動学は (3) 式で示される。

$$\dot{x}_v = J_v \dot{q}_v \quad (3)$$

ここで、 $q_v = (q_r, q_l)^T$ 、 $x_v = (x_v, \phi)^T$ である。

3 制御系の設計

移動マニピュレータの制御系の設計方法は主に2つのタイプに分類される。ここで、移動マニピュレータに与えるタスクの中で重要なものは、軌道追従と姿勢安定化の2つとする。

1つ目の設計方法は、車輪部分とマニピュレータ部分を統一して、1つのシステムとみなす「システム統一設計法」である。全体の逆運動学を用いて制御系を構成することで、複雑な移動マニピュレータの構造でも一意に指令を決定できる。そのため、全体の構造に冗長自由度を有することを利用して、零空間における制御系設計が、車輪部分とマニピュレータ部分両方に対して可能となる。従って、作業空間で軌道追従制御を設計して、零空間で姿勢安定化制御を設計すると、姿勢を安定化させながら正確な軌道追従を行うことができる。しかしこの設計方法では、作業空間の軌道追従制御が、零空間の姿勢安定化制御に対して大きく干渉するため、軌道追従が高速でなされると姿勢安定化を達成できない。本研究では、高速時における姿勢安定化と軌道追従の両立を目指すため、上記の設計方法は適していない。

そこで、もうひとつの設計方法を本研究における制御系設計の際に適用する。それは、車輪部分とマニピュレータ部分を分離して、独立な2つのサブシステムとみなす「サブシステム分解設計法」である。サブシステムごとの逆運動学を用いてそれぞれ独立に制御系を構成することで、車輪部分とマニピュレータ部分に生じる互いの干渉を比較的低減することができる。そのため、マニピュレータ部分の作業空間においてロボットの姿勢を崩す制御を設計して、車輪部分の作業空間において姿勢安定化制御を設計すると、高速で走行する際においても姿勢安定化を実現できる。従って、高速時において姿勢安定化と軌道追従の両立を目指すには、こちらの設計方法がより適していることがわかる。

3.1 車輪部分の制御系設計

車輪部分は2自由度を有しているため、2つの制御を設計できる。

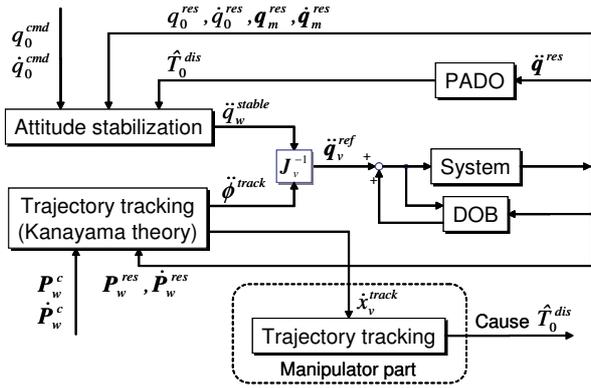


図 5: 車輪部分のブロック線図

1つ目は、“姿勢安定化制御”である。2輪駆動型移動ロボットにおける車体の傾きは、受動関節であるため、他の部位によって間接的に制御しなければならない。力学の関係から車輪角による姿勢安定化制御の式が以下のように求まる。

$$\ddot{q}_w^{stable} = \frac{1}{M_{0w}} \left[M_{00} \{ K_1' (q_0 - q_0^{cmd}) + K_2' (\dot{q}_0 - \dot{q}_0^{cmd}) \} - \hat{T}_0^{dis} \right] \quad (4)$$

ここで、(4)式は、ゲイン K_1' と K_2' が正の定数である場合、リアプノフの安定定理によって漸近安定性が保証されている。また、この姿勢安定化は受動関節外乱 \hat{T}_0^{dis} を補償する式となっている。この受動関節外乱は、受動関節外乱オブザーバ [1] によって推定される。

2つ目の制御は、“軌道追従制御”である。kanayama 手法 [2] に基づいて、与えられた軌道を追従するための目標速度（並進方向・旋回方向）を以下のように決定する。なお、 K_x, K_z, K_ϕ は正の定数である。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_w^c \cos \phi_w^e + K_x x_w^e \\ \dot{\phi}_w^c + v_w^c (K_z z_w^e + K_\phi \sin \phi_w^e) \end{bmatrix} \quad (5)$$

以上の2つの制御系の出力を、車輪に対する運動学 (3) 式の逆運動学に代入して、車輪のモータに与える加速度を求める。

$$\ddot{q}_v = J_v^{-1} [R \ddot{q}_w^{stable}, \ddot{\phi}^{track}]^T \quad (6)$$

ここで、 \ddot{q}_w^{stable} は姿勢安定化を実現する制御出力、 $\ddot{\phi}^{track}$ は旋回方向における軌道追従目標速度を実現する制御出力である。そのため、並進方向における軌道追従目標速度は、車輪によって直接制御されない。そこで、次節のマニピュレータ部分によって並進方向における軌道追従目標速度を実現する。最後に、車輪部分の制御系ブロック線図を図5に示す。

3.2 マニピュレータ部分の制御系設計

マニピュレータ部分では、前節で実現できなかった並進方向における軌道追従制御を行う。並進方向への軌道追従制御の概念は以下の2つの流れである。まず、マニピュレータの先端位置を前後に動かすことで、重心変動を引き起こす。重心変動によって生じた受動関節外乱を補償しようと車輪が動く。その車輪の動きによって軌道追従目標速度に近づくことが1つ目の概念である。また、マニピュレータの先端位置制御は、ワールド座標に対する先端の位置偏差を利用するので、モデル化誤差などに強い軌道追従制御系を組める。これが2つ目の概念である。以上の概念を有する先端位置制御は (8) 式で表される。

$$\ddot{x}_e^{ref} = Kp(x_e^{ini} - x_e^{res}) + Kv(\dot{x}_v - \dot{x}_e^{res}) \quad (7)$$

$$\ddot{y}_e^{ref} = Kp(y_e^{ini} - y_e^{res}) + Kv(0 - \dot{y}_e^{res}) \quad (8)$$

ここで、 x_e^{ini} と y_e^{ini} はマニピュレータ先端位置の初期位置である。 \dot{x}_e^{res} は絶対座標系におけるマニピュレータ先端位置の速度応答である。よって、1行目の式では、マニピュレータ (x 座

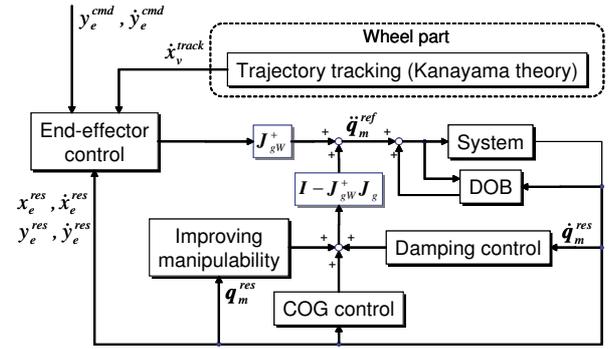


図 6: マニピュレータ部分のブロック線図

標) 初期位置を保持とする力に外乱として軌道追従目標速度を実現する力を加えている。2行目の式では、マニピュレータ (y 座標) を初期位置に保つ制御則を示している。

また、マニピュレータ部分は冗長性を有しているため、零空間におけるサブタスクの制御系を設計できる。このサブタスクは作業空間に影響を及ぼさないため、作業空間のメインタスクを達成しつつ、システムの安定性を向上させる制御系を零空間で構成できる。零空間制御を含んだ逆運動学を (9) 式に示す。

$$\ddot{q}_m = J_e^+ \ddot{x}_e + (I - J_e^+ J_e) \eta \quad (9)$$

ここで、 \ddot{x}_e は (8) 式で表される制御出力ベクトルである。 η は零空間入力ベクトルであり、作業空間に影響を及ぼさない任意の制御入力を指定できる。最後に、マニピュレータ部分の制御系ブロック線図を図6に示す。

4 実験

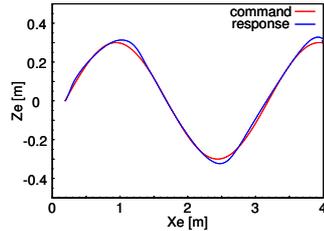


図 7: 軌道追従

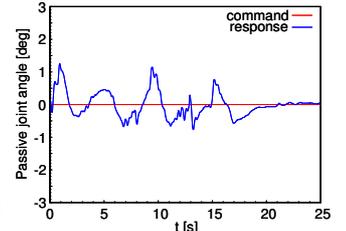


図 8: 受動関節角

提案手法の有効性を確認するため、(11) 式に示す正弦波の軌道を追従する実験を行った。

$$\dot{x}_e^{cmd} = 0.3 \quad (10)$$

$$\dot{z}_e^{cmd} = 0.06 \pi \cos\left(\frac{\pi t}{5.0}\right) \quad (11)$$

軌道追従の結果を図7、そのときの姿勢安定化の結果を図8にそれぞれ示す。

5 結論

車輪部分とマニピュレータ部分を分離して制御系を設計することで、高速時における姿勢安定化を実現できた。また、従来の重心位置制御と異なり、マニピュレータ先端位置の直接制御とすることで、モデル化誤差などに強い軌道追従を実現できた。以上のことから、提案手法の有効性を実験により確認した。今後の課題としては、軌道追従の性能と姿勢安定化の性能を関連付けるゲインの解析をする必要がある。

参考文献

- [1] A. Nakamura and T. Murakami: “A Stabilization Control of Two Wheels Driven Wheelchair”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4863 - 4868, 2009
- [2] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi: “A stable tracking control method for an autonomous mobile robot”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 384 - 389, 1990