

走行中作業を行うモバイルマニピュレータの要素技術開発*

Development of Elemental Technologies for Mobile Manipulator That Perform Work While Running

杉山 俊一郎 寺井 文人 近藤 祐輝
Shunichiro SUGIYAMA Fumihito TERAJ Yuki KONDO

In the automotive industry, products are increasingly diversified and produced in small quantities, making it difficult to rationalize production with fixed automated lines. In this paper, we constructed a model to estimate the posture of a mobile manipulator that combines an AMR and a manipulator, and developed a method to perform assembly and pick-and-place operations without slowing down or stopping while running. Moreover, we demonstrated a series of operations for picking, placing, and assembling parts by the proposed method with a real machine.

Key words :

mobile manipulator, robot, AMR, handling

1. 緒言

自動車製造業界では近年部品の多品種・少量化が進み、特に意匠製品においては製品寿命が短いため単純な自動化ラインでは生産合理化が困難であるという問題がある。また部品数・組み順等の制約から、付加価値を生まない搬送のみの時間やラインに部品を供給する水すまし作業が工程の大きな割合を占めている。これに対し AMR (Automated Mobile Robot) と産業用ロボットを組み合わせたモバイルマニピュレータは作業空間内を移動し広範囲に作業を行うことが出来る^{1)~6)}。しかし供給回数が多い小型部品では AMR は走行と停止を繰り返す必要があり加減速に要する時間のロスが大きい。走行中に作業を行うことで作業効率を向

上する必要がある。モバイルマニピュレータの走行や振動に関する従来研究として、羽多野ら³⁾は走行中の路面凹凸がモバイルマニピュレータに与える外乱トルクを算出する方法を提案しているが、サスペンションによる姿勢変化を考慮していない。また松岡ら^{4)~6)}はモバイルマニピュレータのサスペンションによる姿勢変化を考慮した手先位置誤差の解析を行っているが、マニピュレータ動作中の走行を考慮しておらず、手先変位の評価はシミュレーションによる検証に留まっている。

そこで本研究では AMR と 6 軸産業用マニピュレータを組み合わせたモバイルマニピュレータを用いて走行中に減速や停止することなく組み付け・Pick&Place 作業を行う技術を開発した。本研究では定速走行中であつても路面凹凸やサスペンションにより車体姿勢変

化があることに着目し、サスペンションを含めた車体のモデル化及びモデルを用いて Δt 秒後の車体姿勢を予測しマニピュレータ指令値を生成する予測制御を構築した。また構築した制御により手先を空間上の一点に静止させ、部品を把持可能であるか実機で確認した。

2. モバイルマニピュレータの構成とモデル化

2.1 機器構成

本研究では生産工程変更に対するフレキシブル性確保のため移動ロボットとして AMR を、マニピュレータとして産業用 6 軸マニピュレータ (DENSO WAVE 製 VS060) を使用する (Fig. 1)。AMR は走行振動による搬送物の落下や破損を防ぐため空気入りタイヤを用いた対向 2 輪駆動型を採用し、2 つの受動輪 (キャスト) を備える。また駆動輪は空気式サスペンションを、キャストはバネを設けることで走行振動の低減を図る。

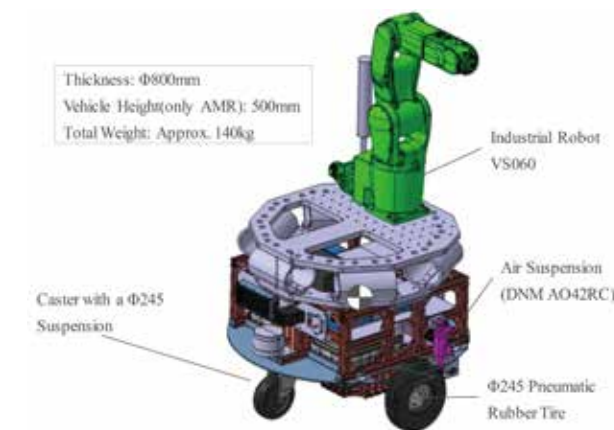


Fig. 1 Mobile manipulator

2.2 サスペンションモデル

上記構成ではサスペンションにより走行時に車体のロール、ピッチ方向の姿勢変化が生じ、マニピュレータ手先位置が変化する。この車体姿勢の変化を推定するため、サスペンションを考慮して車体をモデル化する。車体姿勢および角速度は車体位置や並進速度に対し独立であるとし、車体はマニピュレータを含めて剛体とみなす。また、車輪は常に接地しているとする。更に、サスペンションは鉛直上方向のみに力を及ぼすとしてバネ・ダンパモデルを構築する。Fig. 2 にサスペンションモデルを示す。

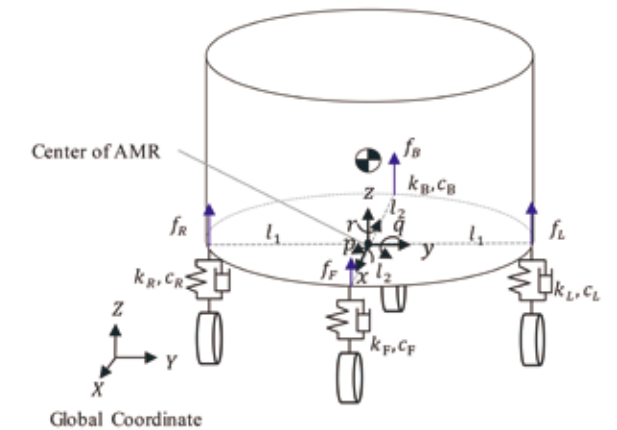


Fig. 2 Suspension model of mobile manipulator

Fig. 2 に示す記号を以下に定義する。

M : 質量

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} : \text{車体原点周りの慣性モーメント (一定と仮定)}$$

f_B, f_R, f_L, f_F : 車体が各車輪のサスペンションから受ける力 (鉛直方向のみ)

ψ, θ, ϕ : 世界座標系からみた車体姿勢 (z - y - x オイラー角)

$\omega = (p, q, r)$: 車体座標系からみた車体の角速度

$k_i, c_i (i=\{B, R, L\})$: 各車輪のサスペンションのバネ定数, ダンパ係数 (一定と仮定)

l_1, l_2 : 車体原点からバネまでの距離

この時、車体の回転運動方程式は以下のように表せる。

$$\frac{dH}{dt} + \omega \times H = M \quad \dots (1)$$

H : 角運動量

M : 車体に加わるモーメント

今回は慣性モーメントは対角成分のみ、サスペンションは鉛直方向にのみ力を発生すると仮定しているため、 H, M はそれぞれ以下のように表せる。

$$H = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}p \\ I_{yy}q \\ I_{zz}r \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 f_R + l_1 f_L \\ -l_2 f_F + l_2 f_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

*杉山, 他: 計測自動制御学会 第 22 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2021) 予稿集 (2021) p.3274.

よって式(1)～(3)より運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} I_{xx}\dot{p} \\ I_{yy}\dot{q} \\ I_{zz}\dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1f_R + l_1f_L + (I_{yy} - I_{zz})q \\ -l_2f_F + l_2f_B + (I_{zz} - I_{xx})r \\ (I_{xx} - I_{yy})pq \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

また車体が各サスペンション ($i = F, B, L, R$) から受ける力は、サスペンション上端の釣り合いの位置からの変位とその時間微分を d_i, \dot{d}_i とすると、

$$f_i = -k_i d_i - c_i \dot{d}_i \quad \dots (5)$$

となり、車体の中心からみた各サスペンション上端の位置を x_i, y_i, z_i 、車体の姿勢を ψ, θ, ϕ とすると、

$$\begin{aligned} f_i = & -k_i(x_i \sin \theta - y_i \sin \phi \cos \theta - z_i \cos \phi \cos \theta + z_i) \\ & - c_i\{x_i \cos \theta \cdot \dot{\theta} - y_i(\cos \phi \cos \theta \cdot \dot{\phi} - \sin \phi \sin \theta \cdot \dot{\theta}) + \\ & z_i(\sin \phi \cos \theta \cdot \dot{\phi} + \cos \phi \sin \theta \cdot \dot{\theta})\} \quad \dots (6) \end{aligned}$$

と表せる。

最後に車体座標系から世界座標系への変換が、

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

と表せる。以上、式(5)～式(7)より車体姿勢の非線形モデルは

$$\dot{\theta} = f(\theta), \quad \theta = (\phi, \theta, \psi, p, q, r) \quad \dots (8)$$

と表すことが出来る。

3. 姿勢予測とマニピュレータ指令値生成

3.1 姿勢予測とマニピュレータ指令値生成

マニピュレータは指令値に対する動作の遅れ時間やモータトルクの制約上高速動作できないことがあり、走行中に時々刻々と変化する車体位置・姿勢をもとに手先位置を制御することが難しい。そこで現在から Δt 秒後までの車体位置・姿勢を予測してマニピュレータ指令値を生成することで高精度な手先位置制御を行う方法を提案する。

まず現在位置 x_t と現在速度 v_t から Δt 秒後の車体位置 $x_{t+\Delta t}$ を等速度運動を仮定して求める。

次に式(7)で与えられる非線形モデルから時刻 t における現在姿勢 θ_t を初期値とする4段4次ルンゲクッタ法を用いて解くことにより Δt 秒後の車体姿勢 $\theta_{t+\Delta t}$ を求める。現在速度 v_t および現在姿勢 θ_t を求める方法は後述する。

次に $x_{t+\Delta t}$ 、 $\theta_{t+\Delta t}$ と事前に設定した手先目標点 P から時刻 $t+\Delta t$ におけるマニピュレータ目標姿勢を逆運動学により求め時刻 $t+\Delta t$ に目標姿勢を達成するようにマニピュレータを動作させる。以上により応答性の低いマニピュレータであってもロバストに手先位置を制御することが可能となる。

3.2 オプティカルフローセンサによる速度推定

3.1 節の方法では現在速度 v_t および現在姿勢 θ_t を求める必要がある。本研究ではIMUおよび車体底面に取り付けた複数のオプティカルフローセンサを用いて速度・姿勢推定を行う。IMUは車体の3軸加速度および3軸角速度を出力し、オプティカルフローセンサは地面に対するセンサ取り付け点の2軸速度を出力する。オプティカルフローセンサは車体底面に8個配置する(Fig. 3)。

上記サスペンションモデルとセンサ値から拡張カルマンフィルタ⁷⁾を用いて車体速度・姿勢を推定する。車体位置、姿勢、速度、加速度を状態とし、3次元剛体の外力なし運動モデルによる予測ステップ1回とIMU、車輪エンコーダ及びオプティカルフローセンサ出力によるフィルタリングステップをセンサ個数分実行し、これを20Hzの周期で行う。

上記拡張カルマンフィルタによる計算により、オプティカルフローセンサの個数を増やすほど速度推定精度が向上することを実機で確認した。室内の平坦路面(Fig. 4)においてAMRを約0.2m/sで4m直進走行させ($n=10$)、速度推定結果と真値の誤差分散を評価した。結果としてオプティカルフローセンサ使用個数を増やすほど誤差分散が低下した(Fig. 5)。

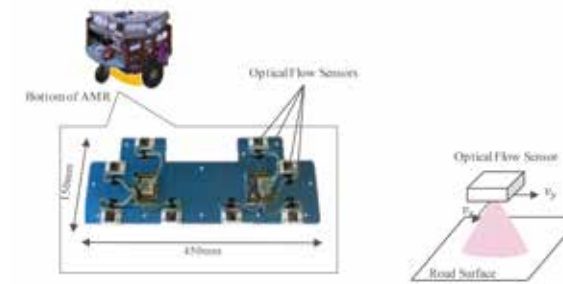


Fig. 3 Position of optical flow sensors

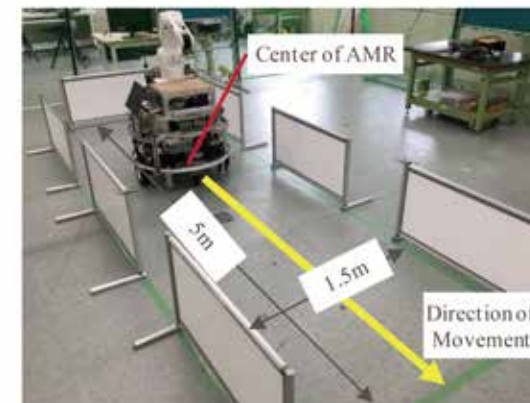


Fig. 4 Measurement Environment

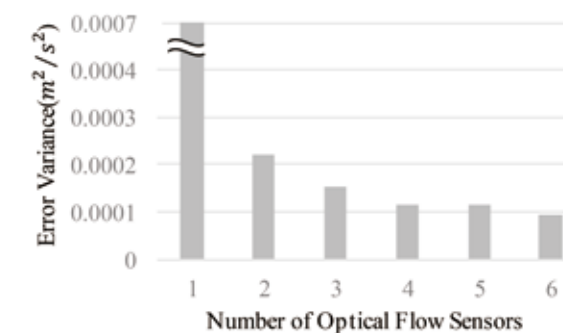


Fig. 5 Error variance of velocity by a number of sensors

4. 予測制御の精度評価実験

4.1 姿勢予測精度の実機検証

走行時の車体姿勢変化を考慮したサスペンションモデルによる Δt 秒後の姿勢予測精度を実機で確認した。まず、マニピュレータを動かさず Fig. 4 の環境で AMR を 0.2m/s で 4m 直進走行させた時の AMR とマニピュレータ手先の位置、速度、姿勢をモーションキャプチャで計測した ($n=21$)。次に上記データをオフラインで再生し、任意の時刻の AMR 速度・姿勢を初期値として 0.2s 後までの車体速度・姿勢を

等速運動を仮定したモデルと 2 節で提案したサスペンションモデルで予測した。最後に上記 2 モデルの出力である AMR 姿勢 (ϕ, θ, ψ) を手先位置の変位に変換したものと実際の手先位置の変位を比較した。結果を Fig. 6 に示す。等速運動を仮定したモデルでは 0.2s 後の手先位置予測誤差が平均 3.4mm であったのに対し、サスペンションモデルでは平均誤差 1.6mm であり、より高精度に手先位置を予測可能である事が確認された (Fig. 7)。

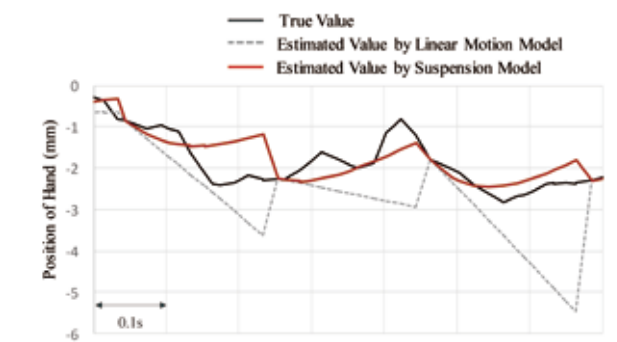


Fig. 6 True value and estimated value of hand position

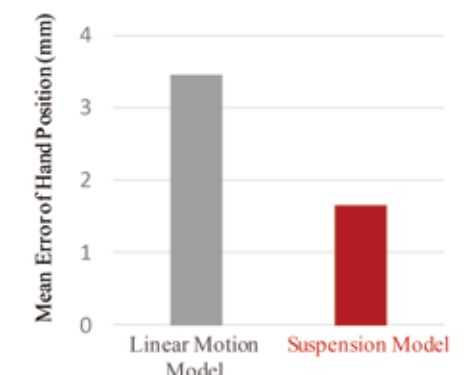


Fig. 7 Mean error of hand position estimation

4.2 予測制御による手先静止実験

提案手法を用いて走行中にマニピュレータ手先を空間上に静止させる実験を行う。Fig. 4 の環境において AMR を 0.3m/s で直進走行させ、予測制御を用いない場合、定速モデルによる予測制御を用いる場合において、制御中(約2秒間)の目標点からみた水平方向の手先位置をモーションキャプチャで計測する。但し予測制御の効果を調べるため、現在位置・速度・姿勢はモーションキャプチャにより計測した値を使用する。

4.3 手先静止実験結果

3手法において各8回走行時の世界座標系での手先位置軌跡を Fig. 8 に示す。AMRの進行方向を+x, その左方向を+yとした。予測制御なし、定速モデルに対し、サスペンションモデルでは手先位置がより狭い範囲内に留まり、手先位置のばらつき (3σ) は x 方向に 0.4cm, y 方向に 0.8cm であった (Fig. 9)。

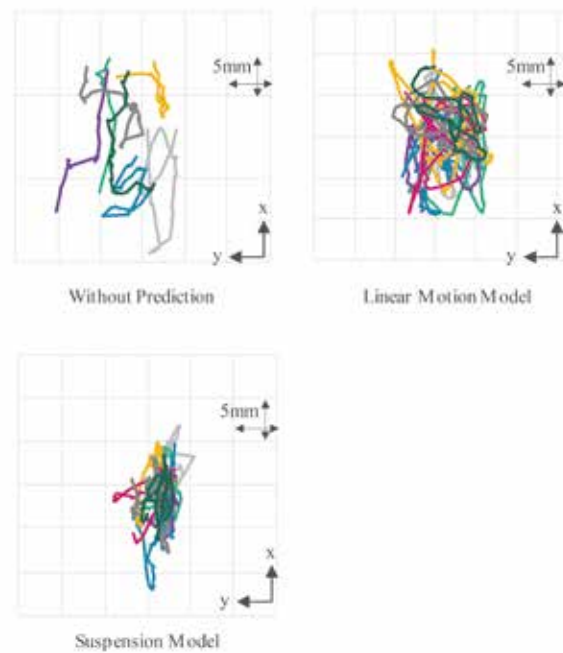


Fig. 8 Trajectory of hand position

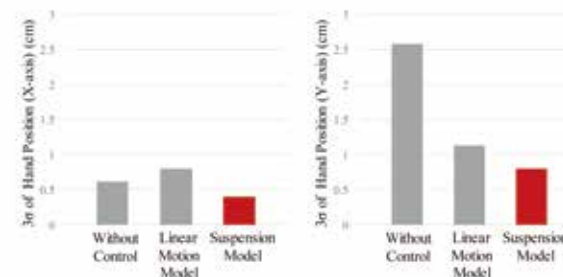


Fig. 9 Variation of hand position

5. 部品把持実験

5.1 実験方法

提案手法による手先静止制御を応用し、静止部品の把持が可能か実験により確認する。Fig. 4 の環境で AMR を 0.2m/s で走行させる。対象部品は樹脂製とし、マニピュレータ手先に取り付けた平行チャックの開閉により把持を行う。4節における目標点を

部品上方→部品把持位置→部品上方と切り替えることで部品の走行中把持を行う。

5.2 実験結果

部品の走行中把持を行った動画を Fig. 10 に示す。走行中に車体姿勢が変化しても部品の走行中把持が可能であり提案手法の有効性が示された。



Fig. 10 Picking/Placing task

6. 結言

本稿ではサスペンションを考慮したモバイルマニピュレータの運動モデルを構築し、モデルを用いて Δt 秒後の車体姿勢を予測することでマニピュレータを高精度に制御する手法を提案した。また、車体底面にオプティカルフローセンサを複数取り付けこ

とで車体速度推定精度を向上可能であることを実機で確認した。更に、上記予測制御を用いて走行中にマニピュレータ手先を空間上に静止させ、部品を把持可能であることを実機で確認した。

今後の課題として、本研究では簡単化のためマニピュレータを剛体とみなしたが、マニピュレータの運動に伴う影響が無視できないためより正確な運動モデル構築のためマニピュレータのモデル化を検討する必要がある。また、車体の質量や重心、サスペンションのバネ定数等の経年変化に対する影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Hootsmans, Norbert, and Steven Dubowsky. "Large motion control of mobile manipulators including vehicle suspension characteristics." ICRA. Vol. 91. 1991.

著者



杉山 俊一郎

すぎやま しゅんいちろう

株式会社 SOKEN 研究 3 部
ロボット, AMR 関連の要素技術開発に従事



近藤 祐輝

こんどう ゆうき

セーフティシステム製造 2 部
コックピット製品の工程設計に従事

- 2) 見浪護, 藤原直史, and 柘植広志. "カメラフィードバックを用いた自律移動マニピュレータの位置・速度制御." 日本ロボット学会誌 11.2 (1993): 263-271.
- 3) 羽多野正俊, et al. "移動マニピュレータの凹凸路面走行時における外乱の影響." 日本ロボット学会誌 20.8 (2002): 883-892.
- 4) 松岡秀佳, 庄司幸広, and 大隅久. "1P1-O04 全方向移動マニピュレータのサスペンションを考慮した手先位置誤差解析 (作業移動ロボット)." ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2011 (2011): _1P1-O04_1.
- 5) 松岡秀佳. "サスペンションを考慮した全方向移動マニピュレータの手先位置誤差の補正." 大学院研究年報 理工学研究科編 42 (2012).
- 6) 西村真澄, et al. "1A2-A01 台車部のサスペンション特性を利用した複数の全方向移動マニピュレータによる協調搬送 (複数ロボットの協調制御)." ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2013. 一般社団法人日本機械学会, 2013.
- 7) Moore, Thomas, and Daniel Stouch. "A generalized extended kalman filter implementation for the robot operating system." Intelligent autonomous systems 13 (2016): 335-348.



寺井 文人

てらい ふみひと

生産技術部
環境分野, 安心分野の生産システム開発に従事