冗長オドメトリ系とジャイロ情報の融合によるモジュール型
全方向移動ロボットのデッドレコニング*橋本 雅文^{*1}, 富家 孝宏^{*2}, 大場 史憲^{*1}Dead Reckoning of a Modular Omnidirectional Vehicle
by Fusing Redundant Odometry and Gyro InformationMasafumi HASHIMOTO^{*3}, Takahiro TOMIIE and Fuminori OBA^{*3} Hiroshima University, Div. of Machine Design Engineering,
Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527 Japan

This paper proposes a dead reckoning of a modular omnidirectional vehicle. Wheel units assembled in the vehicle are modularized on their mechanisms and controllers, so that we can easily tailor the vehicle to individual transfer applications. Each of the wheel modules estimates the vehicle position based on the information of the odometry and gyro. The wheel modules exchange their local estimates. The local estimates are fused in a decentralized manner, and then the wheel modules can precisely identify the vehicle position under the conditions of wheel slips and changes of wheel radius. The dead reckoning algorithm is formulated based on the extended Kalman filter, and some fusion rules are incorporated into the algorithm to improve the accuracy of the dead reckoning. Simulation and experimental results show that our dead reckoning can provide better positioning accuracy than the conventional dead reckoning.

Key Words: Moving Robot, Measurement, Omnidirectional Vehicle, Dead Reckoning, Data Association, Kalman Filter

1. 緒 言

移動ロボットやビークルの分野において, 全方向移動ロボットはその機動性の高さから注目されている. その中で, ホロノミック型全方向ロボットは任意の姿勢から位置・姿勢の3自由度を独立して即座に制御できることから, 多くの研究が行われている^{(1)~(4)}. しかし, 特殊な車輪機構を用いることから, 走行中に車体に振動が発生する, 路面・車輪間の摩擦が不十分でスリップが発生しやすい, 車輪の摩耗が著しい等の欠点を有する.

他方, 非ホロノミック型全方向移動ロボット⁽⁵⁾⁽⁶⁾は, 並進動作や旋回動作に際して車輪の向きをそろえる準備動作が必要でホロノミック型に比べて機動性は劣るものの, 準備動作に要する時間は現実的には極短時間である. また, ゴムタイヤや中空タイヤの使用が可能なことから, 前述したような車輪機構に起因する車体の振動やスリップ等の

問題が少なく, 舗装路, 傾斜地, 不整地での利用も可能となる. そのため, 実際には非ホロノミック型全方向移動ロボットがよく利用される.

さて, 生産工場や港湾・製鉄ヤード等において, 搬送用移動ロボット(AGV)を中核とした高度物流系が構築されようとする中で, ロボットに要求されるペイロードは適用対象毎に大きく異なることから, ロボット設計開発におけるコストやリードタイムの増大が深刻な問題となりつつある. それを解決するには, 移動ロボットの車輪をユニット化しておき, 要求されるペイロードに応じてそれらの台数を定めて構築するモジュール型移動ロボットが有効となる⁽⁷⁾⁽⁸⁾. このような観点から, 筆者らは, 非ホロノミックなモジュール型全方向移動ロボットの構築を目的として, そのナビゲーション系と経路追従制御系の検討を行っている.

移動ロボットのナビゲーションにおいて, 内界センサ情報によりロボットの現在位置を正確に知るデッドレコニングは重要な開発課題のひとつで

* 原稿受付 1999 年 7 月 23 日.

^{*1} 正員, 広島大学工学部 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1).^{*2} 広島大学大学院 [現: (株)クボタ].

E-mail: hasimoto@mec.hiroshima-u.ac.jp

あり、車輪エンコード情報に基づくオドメトリとジャイロ情報を併用したデッドレコニング法が今日、注目されている^{(9)~(11)}。デッドレコニングではロボットの現在位置が速度、角速度の積分により得られることから、ロボットの位置誤差を軽減するには、速度、角速度の推定精度をともに向上させる必要がある。しかし、従来のオドメトリとジャイロに基づくデッドレコニングは、本質的に角速度の推定精度のみを改善しており、速度誤差の軽減はなされていない。

本論文では、平坦な路面を走行するモジュール型全方向移動ロボットを前提として、冗長なオドメトリ系とジャイロ情報を融合してロボットの速度、角速度推定精度を改善し、精度よいデッドレコニングを実現する方法を提案する。そして、その有効性を計算機シミュレーションにより示す。

2. 移動ロボットの概要

図1のように、移動ロボットは車体モジュール(DM)と車輪モジュール(WM)からなる。各WMは動力系、センサ系、情報処理系、DMや他のWMと情報交換を行うための有線通信系を有している。WMの軸荷重が一定であることから、移動ロボットの要求ペイロードが与えられるとWMの台数が定まり、移動ロボットが構築できる。

WMの車輪機構は左右独立駆動輪タイプで、自由旋回関節を介してDMの下部と連結され、左右駆動輪の回転速度を制御することで、連結点の速度とその方向を指示できる。WMの旋回軸は駆動輪の車軸中点上に位置することから、WMのDM連結点の動作は非ホロノミックな運動となり、その結果、DMの動作も非ホロノミックなものとなる。そのため、各WMの運動はアッカーマン幾何学に従うよう制御する。WMはDMの目標動作を実現する主動WMと、主動WMによって決定されたDMの動作に従うよう制御する受動的なキャストの役割を果たす従動WMから構成される。ロボット制御系の詳細は文献(12)を参照されたい。

3. デッドレコニング

3・1 概要 各WMの左右車輪、旋回関節に設けた回転角計測用のエンコードの出力情報より、各WMではオドメトリに基づくDMの位置が推定できる。しかし、WM間での動作干渉により生じる車輪の

Fig.1 Overview of modular omnidirectional vehicle

滑り、タイヤ車輪の空気圧、DMに搭載する搬送物の重量や旋回時の遠心力等により生じる車輪径の変動等により、オドメトリ単独では方位推定精度が大きく劣化する。そこで、DMにジャイロを搭載し、その旋回速度情報を利用して方位推定精度の劣化を軽減する。

さらに、各WMではオドメトリに基づくDMの位置が推定できることから、ロボット全体においてオドメトリ系は冗長となる。そこで、冗長なオドメトリ情報を融合して速度誤差の推定精度を改善する。

以上のように、冗長なオドメトリ系とジャイロ情報を融合してロボットの速度、角速度推定精度を改善し、精度よいデッドレコニングを実現する。

3・2 オドメトリの基礎式 いま、 n 台のWMからなるロボットを考える。WM $i(i=1, \dots, n)$ において、図2に示す並進速度 A_i (縦方向)、 C_i (横方向)と旋回速度 B_i は、

$$\begin{pmatrix} A_i(t) \\ B_i(t) \\ C_i(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_{Ri}(t)}{2} & \frac{r_{Li}(t)}{2} \\ \frac{r_{Ri}(t)}{d_i} & -\frac{r_{Li}(t)}{d_i} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_{Ri}(t) \\ \dot{q}_{Li}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta A_i(t) \\ \Delta B_i(t) \\ \Delta C_i(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

で求め、これを以下のようにベクトル表記する。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t) &= \mathbf{J}_i(t) \dot{\mathbf{q}}_{\text{wheels}}(t) + \Delta \mathbf{u}_i(t) \\ &= \hat{\mathbf{u}}_i(t) + \Delta \mathbf{u}_i(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし, t は時間, $\mathbf{r}_i = (r_{Ri}, r_{Li})^T$ は駆動輪の車輪径, d_i はトレッド長を表わす. なお, 添字 R, L は右, 左駆動輪に関する変数である. $\dot{\mathbf{q}}_{wheeli} = (\dot{q}_{Ri}, \dot{q}_{Li})^T$ は車輪エンコーダ出力の差分により算出できる駆動輪の回転速度である. $\Delta \mathbf{u}_i = (\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta C_i)^T$ は車輪のスリップや走行路面の凹凸等により生じる外乱を表わす.

DMの運動学は次式で記述できる (付録参照).

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i(t), \mathbf{u}_i(t), \mathbf{q}_{ai}(t), \dot{\mathbf{q}}_{ai}(t)) \quad (3)$$

ただし, $\mathbf{x}_i$ は地上固定座標系におけるDMの位置・姿勢ベクトルを, q_{ai} , $\dot{q}_{ai}$ は旋回関節の旋回角 (エンコーダ出力) と速度を表わす. $\mathbf{f}(\cdot)$ は*の非線形関数.

いま, 車輪径の変動は, 以下のランダムウォークで記述できるとする.

$$\mathbf{r}_i(t+1) = \mathbf{r}_i(t) + \Delta \mathbf{r}_i(t) \quad (4)$$

以上より, WMiに関する運動学は

$$\xi_i(t+1) = \begin{pmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}_i(t), \hat{\mathbf{u}}_i(t) + \Delta \mathbf{u}_i(t), \mathbf{q}_{ai}(t), \dot{\mathbf{q}}_{ai}(t)) \\ \hat{B}_i(t) + \Delta B_i(t) - \dot{q}_{ai}(t) \\ \mathbf{r}_i(t) + \Delta \mathbf{r}_i(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

となり, これを以下のようにベクトル表記する.

$$\xi_i(t+1) = \mathbf{g}(\xi_i(t), \hat{\mathbf{u}}_i(t), \Delta \mathbf{w}_i(t)) \quad (6)$$

ただし, $\xi_i = (\mathbf{x}_i^T, \dot{\theta}_i, \mathbf{r}_i^T)^T$. $\dot{\theta}_i$ はDMの旋回速度, $\Delta \mathbf{w}_i = (\Delta \mathbf{u}_i^T, \Delta \mathbf{r}_i^T)^T$ は外乱ベクトルを表わす.

(5)式右辺の第2列目の式は旋回速度に関する運動学を表わし, ジャイロ観測値とオドメトリ情報とを融合するために導入したものである⁽¹⁰⁾.

3・3 位置推定 いま, 外乱 $\Delta \mathbf{w}_i$ を平均値0の正規性白色雑音と仮定すると, WMiはオドメトリに基づき次式で状態推定できる.

$$\hat{\xi}_i(t+1) = \mathbf{g}(\hat{\xi}_i(t), \hat{\mathbf{u}}_i(t)) \quad (7)$$

また, 状態推定値の不正確さは誤差伝播則により, 次式の誤差共分散行列 $\mathbf{P}_i = \mathbf{E}\{\Delta \hat{\xi}_i \Delta \hat{\xi}_i^T\}$ で推定できる.

$$\mathbf{P}_i(t+1) = \mathbf{F}_i(t) \mathbf{P}_i(t) \mathbf{F}_i(t)^T + \mathbf{G}_i(t) \mathbf{Q}_i(t) \mathbf{G}_i(t)^T \quad (8)$$

ただし, $\mathbf{Q}_i$ は $\Delta \mathbf{w}_i$ の共分散行列, $\mathbf{F}_i = \partial \mathbf{g} / \partial \xi_i$,

Fig.2 Notation relating to the wheel module

$$\mathbf{G}_i = (\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{u}_i, \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{r}_i).$$

ジャイロに関する観測モデルは次式となる.

$$\omega_{gyro}(t) = \mathbf{H}_{gyro} \xi_i(t) + \Delta \omega_{gyro}(t) \quad (9)$$

ただし, ω_{gyro} はジャイロ出力を, $\Delta \omega_{gyro}$ は観測誤差である. $\mathbf{H}_{gyro} = (0, 1, 0)^T$.

ジャイロ情報を観測すると, (7)~(9)式をもとに拡張カルマンフィルタ⁽¹³⁾により WMiはオドメトリ情報を次式で更新する.

$$\hat{\xi}_i^+(t) = \hat{\xi}_i(t) + \mathbf{K}_{gyro}(t) \tilde{z}_i(t) \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_i^+(t) = \mathbf{P}_i(t) - \mathbf{K}_{gyro}(t) \mathbf{H}_{gyro} \mathbf{P}_i(t) \quad (11)$$

ただし, $\tilde{z}_i(t) = \omega_{gyro}(t) - \hat{\theta}_i(t)$, $\mathbf{R}_{gyro} = \mathbf{E}\{\Delta \omega_{gyro}^2\}$, $\mathbf{K}_{gyro}(t) = \mathbf{P}_i(t) \mathbf{H}_{gyro}^T [\mathbf{H}_{gyro} \mathbf{P}_i(t) \mathbf{H}_{gyro}^T + \mathbf{R}_{gyro}(t)]^{-1}$.

さて, WMiはWMj($j \neq i$)と通信を行い, WMjの状態推定値のうち, 位置推定値 $\hat{\mathbf{x}}_j^+$ とその誤差共分散 $\mathbf{P}_{ij}^+ = \mathbf{E}\{\Delta \hat{\mathbf{x}}_j^+ \Delta \hat{\mathbf{x}}_j^{+T}\}$ を取得する. $\hat{\mathbf{x}}_j^+$ はWMiにとって観測値とみなせるから以下の観測方程式が成立する.

$$\hat{\mathbf{x}}_j^+(t) = \mathbf{H} \xi_i(t) + \Delta \hat{\mathbf{x}}_j^+(t) \quad (12)$$

ただし, $\mathbf{H} = (1, 0, 0)^T$.

故に, WMiはWMjからの情報をもとに自己の状態推定値を次式で修正できる.

$$\hat{\xi}_i^{++}(t) = \hat{\xi}_i^+(t) + \mathbf{K}(t) [\hat{\mathbf{x}}_j^+(t) - \mathbf{H} \hat{\xi}_i^+(t)] \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_i^{++}(t) = \mathbf{P}_i^+(t) - \mathbf{K}(t) \mathbf{H} \mathbf{P}_i^+(t) \quad (14)$$

ただし, $\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}_i^+(t) \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_i^+(t) \mathbf{H}^T + \mathbf{P}_{ij}^+(t)]^{-1}$.

(13)(14)式に基づく融合において, WM間で推定値情報を交換することから, 実際には位置推定値 $\hat{\mathbf{x}}_i^+$ と $\hat{\mathbf{x}}_j^+$ 間には相関が存在する. しかし, その相関の計算は複雑なため, 無相関を仮定して情報を融合している. そのため推定精度は劣化するが, 推定アルゴリズムの分

散化が可能となる。

なお、外乱 Δw_i を平均値 0 の正規性白色雑音と仮定していることから、外乱に含まれる定常的なバイアスは車輪径推定値に反映される。

3・4 分散の設定ルール 旋回に関する外乱 ΔB_i と車輪径変動 Δr_i の誤差共分散を、それぞれ R_{B_i} , R_{r_i} とする。精度良い状態推定を行うには、 R_{B_i} , R_{r_i} の大きさを状況に応じて変化させる必要がある。

(10)式中の観測残差 $\tilde{z}_i$ をもとに W_{Mi} は自己のオドメトリの信頼性を評価できる。すなわち、 $|\tilde{z}_i|$ が小さい場合オドメトリは信頼でき、逆に、それが大きい場合は旋回に関して大きな外乱を受けていると考えられる⁽⁹⁾。そこで、ジャイロ情報の融合に際して、 W_{Mi} の状態推定値の精度を高めるため、 $|\tilde{z}_i|$ の大きさに応じて R_{B_i} の大きさを以下のように調整する。

$$R_{B_i} = \begin{cases} R_{B,small} & \text{for } |\tilde{z}_i| \leq \mu_z \\ R_{B,large} & \text{for } |\tilde{z}_i| > \mu_z \end{cases} \quad (15)$$

ただし、 $R_{B,small} < R_{B,large}$ 。

上式の閾値 μ_z は次のように定める。いま、外乱 Δw_i 、ジャイロ観測誤差 $\Delta \omega_{gyro}$ がともに平均値 0 の正規性白色雑音と仮定する。観測残差 $\tilde{z}_i$ の分散を α_i^2 で定義すると、変数 $\chi = \tilde{z}_i / \alpha_i^2$ は自由度 1 のカイ 2 乗分布に従うため、次式の確率が定義できる。

$$\text{Prob}(\chi < \chi_a^2) = 1 - \beta \quad (16)$$

ただし、 β は危険率、 χ_a^2 は上側 100 β % 点。

従って、 β を与えることで、閾値は $\mu_z = \alpha_i \chi_a$ により求まる。ここで、(8)式により得られる旋回速度の推定値の分散 $P_{\dot{\theta}}$ を用いることで、観測残差 $\tilde{z}_i$ の分散は理論上、 $\alpha_i^2 = P_{\dot{\theta}}(t) + R_{gyro}(t)$ で定まる。しかし、この α_i^2 を用いると以下の不都合が生じる。

(8)式で算出される $P_{\dot{\theta}}$ は、車輪径変動 Δr_i に関する誤差共分散 R_{r_i} や車輪径推定値の誤差共分散が伝播する構造となっている。すなわち、大きな R_{r_i} を設定したり、車輪径の推定誤差が大きいと $P_{\dot{\theta}}$ も大きくなり、その結果、閾値 μ_z も大きくなる。これは、オドメトリが不正確にもかかわらず、 $|\tilde{z}_i| \leq \mu_z$ を満たして $R_{B,small}$ が採択され、推定精度のより劣化をもたらす。そこで、 μ_z の値を小さくして上記の事態を避けるため、 α_i^2 を $\alpha_i^2 = R_{B,small} + R_{gyro}$ により定める。

ジャイロ情報（旋回速度情報）に基づく車輪径推定は、 W_{Mi} 自身が旋回加速度を伴う走行中にのみ推定が可能であり、また、その旋回加速度が大きいほど推定

が容易である。そこで、いま、すべての W_{Mi} 中、最も大きな旋回加速度を発生している W_{Mi} をリーダー (LWM)、その他の W_{Mi} をフォロワー (FWM) と称する。

そうすると、 $|\tilde{z}_{leader}| \leq \mu_z$ （ただし、 $\tilde{z}_{leader}$ は LWM の観測残差）の状態にある LWM はジャイロ情報をもとに精度良く車輪径を推定でき、 W_{Mi} 中最も位置推定精度が高いと考えられる。他方、FWM はジャイロ情報に基づく車輪径推定値が不正確なことから、LWM から送信される位置推定情報をもとに車輪径や位置の推定精度を改善する必要がある。このような観点から、車輪径変動の誤差共分散 R_{r_i} を次式のように設定する。

$$R_{r_i} = \begin{cases} R_{r,small} & \text{for LWM and } |\tilde{z}_{leader}| \leq \mu_z \\ R_{r,medium} & \text{for LWM and } |\tilde{z}_{leader}| > \mu_z \\ R_{r,large} & \text{for FWM} \end{cases} \quad (17)$$

ただし、 $R_{r,small} < R_{r,medium} < R_{r,large}$ 。

なお、上式に基づく R_{r_i} の設定により、LWM の位置推定値と矛盾のない FWM の車輪径が推定される。従って、各 W_{Mi} 内で推定した車輪径を用いて車輪回転数情報から並進速度、旋回速度を算出することで、 W_{Mi} 相互で相対速度が小さい制御が実現でき、その結果、車輪の滑りの軽減が期待できる。

ロボット制御系は、DM が目標経路に追従するための DM の瞬時旋回中心、目標速度を定める車体制御系 (DM 制御系) と DM 制御系が算出した情報をもとに、DM の目標運動を実現するよう左右駆動輪を速度制御する各 W_{Mi} に設けた車輪制御系 (W_{Mi} 制御系) とからなる。LWM の決定に際して W_{Mi} の旋回加速度を知ることには実際には困難なことから、目標旋回中心に最も近い、すなわち旋回半径が最小の W_{Mi} を LWM とする。これは、曲線経路がクロソイド曲線のような旋回加速度を伴う経路で与えられる場合は、妥当な近似となる。なお、直線経路のように DM の旋回半径が非常に大きい場合は、各 W_{Mi} の旋回加速度が小さく LWM を定める意味はないことから、それまで LWM であった W_{Mi} を引き続き LWM とする。

4. 数値シミュレーション

4 台の W_{Mi} (W_{M1} , 3 は主動 W_{Mi} , 2, 4 は従動 W_{Mi}) からなるロボットを図 3 に示す経路に沿って走行させた。シミュレーションにおいて、ロボットの力学モデルは文献(14)の方法により記述し、タイヤ車輪・路面間の力学モデルは文献(15)を引用した。

各 W_{Mi} におけるオドメトリとジャイロによる状態推

定周期は50ミリ秒，WM間通信に基づく各WMの推定値の融合周期は250ミリ秒である．通信形態はトークンパッシング方式を採用し，4台のWMのうち複数台が推定値情報を同時に広告できないものとした．

ジャイロ出力の特性としては，次章の実験装置の光ファイバジャイロ（日立電線（株）GYACROSS-CL3D(GA)）のバイアス値-0.0523deg/s，標準偏差0.286deg/sを仮定した．左右車輪，自由旋回関節のエンコーダの分解能は実験装置と同様の10000パルス/回転，4096パルス/回転とした．外乱 ΔA_i ， ΔC_i の分散 R_A ， R_C はともに $2.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$ ， ΔB_i に関しては $R_{B,small}=4.5 \times 10^{-4}$ ， $R_{B,large}=0.5 \text{rad}^2/\text{s}^2$ ，車輪径変動 Δr_i の分散は $R_{r,small}=0$ ， $R_{r,medium}=1 \times 10^{-10}$ ， $R_{r,large}=1 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}^2$ である．これらの値は試行錯誤的に求めたものである．

ロボットを図3の経路に沿って20回，速度0.3m/sで走行させた．その際，各WMの左右車輪半径の公称値は10cmとし，実車輪径は9cmから11cmの間で一様乱数を発生させた．以下の4通りの条件でシミュレーションを行った．

Case 1)車輪径推定を行わない場合

Case 2)3.4節で提案した分散設定ルールにおいて，LWMを設けない場合

Case 3)各WMが独立して自己のオドメトリにジャイロ情報のみを融合した場合，すなわち，WM間で推定値の情報交換を行わない場合

Case 4)提案手法

なお，Case 2)，3)ではLWMとFWMとの区別はないため，車輪径に関する分散を以下のように変更した．

$$R_{r_i} = \begin{cases} R_{r,small} = 0 & \text{for } |\tilde{z}_i| \leq \mu_z \\ R_{r,medium} = 1 \times 10^{-10} & \text{for } |\tilde{z}_i| > \mu_z \end{cases}$$

本論文のロボットでは，WMの旋回軸が左右駆動輪の車軸中点にあることから，WMとDMとの連結点ではその瞬間瞬間にWMの進行方向にしか速度を発生できないため，WMが滑らずに走行するには，

Fig.3 Simulation model

全てのWMはひとつの瞬時回転中心(ICR)まわりに運動することが必要となる．そこで，シミュレーションでは，ロボットの走行開始に際して，各WMの向きがひとつのICRを真横に見る向きと一致させている．

図4，5にそれぞれ最終位置でのDMの位置推定誤差，各WMの車輪径推定誤差を示す．各図において(a)～(d)はCase 1)～4)に対する結果である．なお，図4(a)のスケールは(b)～(d)と異なる．図4(a)(b)を比較すると車輪径を推定することで位置推定精度が向上するのが分かる．これはCase 1)では，各WMの左右車輪径の差異（図5(a)）によりオドメトリが算出した旋回速度にバイアス誤差が発生して位置推定精度に影響を与えるのに対し，Case 2)では図5(b)のように左右車輪径の差異が解消されるためである．また，図4，5の(b)(c)よりCase 2)と3)は両者とも車輪径の推定精度に差異がないものの，位置推定誤差に関してはCase 2)の方が小さく，他のWMの情報を融合することで位置推定精度が向上するのがわかる．

図4，5の(b)(d)を比較すると，LWMの導入により位置・車輪径ともに推定誤差が小さくなる．これは，WM相互での情報交換に基づく位置・車輪径推定において，車輪径推定が容易に行えオドメトリによる位置推定精度の高いLWMの情報に重きがおかれるためである．以上より，提案手法により精度よいデッドレコニングが実現できるのが確認された．

最後に，提案手法で推定した車輪径推定値をWM制御系に用いたとき，車輪の滑りの低減度を調べる．図6(a)(b)にそれぞれ20回の走行に対する車輪の縦滑り速度，横滑り速度のrms値を示す．なお，従動WMは本来滑らないように制御していることから主動WMの結果のみを示している．また，図中には比較のため実車輪径が既知としたときの結果（Case 5)）も示している．図より提案手法ではロボットの走行とともに車輪の滑りが軽減していくのが分かる．なお，20～40秒付近で滑りが大きくなるのは，曲線経路走行に際してスリップ角が生じるためである．

5. 基礎実験

図7に示す2台のWMからなる移動ロボットを0.08m/sで左折を有する経路を約3.5m走行させた．プラント雑音に関する分散は $R_A=2.25 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^2$ ， $R_C=6.4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^2$ ， $R_{B,small}=5 \times 10^{-5}$ ， $R_{B,large}=0.5 \text{rad}^2/\text{s}^2$ ， $R_{r,small}=0$ ， $R_{r,medium}=4 \times 10^{-10}$ ， $R_{r,large}=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}^2$ である．各WMにおけるオドメトリとジャイロによる状態推定周期は50ミリ秒，WM間通信に基づく各WMの推定値の融合

Fig.4 Error in position estimate at goal (○:WM1, ●:WM2, △:WM3, ▲:WM4)

Fig.5 Error in estimate of wheel radius at goal (○:WM1, ●:WM2, △:WM3, ▲:WM4)

Fig.6 Slip speed of active wheel module (RMS value)

周期は250ミリ秒である。

ロボットを経路に沿って5回走行させた。WMの左右車輪は硬質ゴム製(車輪半径3.06cm)のため、走行毎に各WMの左右車輪径の初期公称値を2.9, 3.0, 3.1cmの3通りの中から一様に発生させた。以下の3通りの条件でシミュレーションを行った。

Case 1) 各WMが独立して自己のオドメトリのみにより位置推定する場合、

Case 2) 各WMが独立して自己のオドメトリにジャイロ情報のみを融合した場合、すなわち、WM間で推定

値の情報交換を行わない場合

Case 3) 提案手法

図8, 9にそれぞれ最終位置でのDMの位置推定誤差, 各WMの車輪径推定誤差を示す。なお、図8(a)のスケールは他と異なる。これより提案手法により精度よい位置推定ができるのが分かる。

6. 結 言

本論文では、非ホロノームなモジュール型全方向移

動ロボットに関して、ナビゲーション系の基礎となるデッドレコニング法を提案した。主な結果を以下に示す。

- (1)車輪モジュール(WM)におけるオドメトリ情報の冗長性と車体モジュール(DM)に搭載したジャイロの出力情報をもとに、拡張カルマンフィルタによりDMの位置とWMの車輪径を推定する方法を提案した。
- (2)状態推定の精度向上を図るため、WMの旋回に関する誤差分散や車輪径の誤差分散を状況に応じて変化させるルールを提案した。
- (3)数値シミュレーションと実験により提案手法の有効性を示した。

Fig.7 Overview of experimental vehicle

本研究は、NEDO地域コンソーシアム研究開発事業「タスク適合型群構成搬送ロボットシステムTRIPTERSの開発研究」の一部として研究されたものである。

文 献

- (1) Patrick F.Muir, et al., "Kinematic Modeling for Feed-back Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot", *Autonomous Robot Vehicles edited by Ingemar J. Cox and Gordon T. Wilfong, Springer-Verlag*, (1990) 25-31
- (2) Francis G.Pin, et al., "A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robot", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **10-4** (1994) 480-489
- (3) Mark West and Haruhiko Asada, "Design of a Holonomic Omni-directional Vehicle", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1992) 97-103
- (4) Hajime Asama, et al., "Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Mechanism", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1995) 1925-1930
- (5) David B.Reister, et al., "Position and Constraint Force Control of a Vehicle with Two or More Steerable Drive Wheels", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **9-6** (1993) 723-731
- (6) Yoshikazu Mori, et al., "A Study on the Mechanism and Control of Omni-Directional Vehicle", *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS96)* (1996) 52-59
- (7) Thomas Burk and Hugh F.Durrant-Whyte, "Kinematics for Modular Wheeled Mobile Robots", *Proc. of IEEE/RSJ Int.*

Fig.8 Error in position estimate at goal (○:WM1, ●:WM2)

Fig.9 Error in estimate of wheel radius at goal (○:WM1, ●:WM2)

- Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'93)* (1993) 1279-1286
- (8) Arthur G.O. Mutambara, "Decentralized Estimation and Control for Mutsensor systems", *CRC Press* (1998)
- (9) 前山祥一 他, "移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロのセンサ融合によるデッドレコニングシステム", *日本ロボット学会誌*, **15-8** (1997) 1180-1187
- (10) 小森谷 清, 大山英昭, "光ファイバジャイロを利用した移動ロボットの位置推定の一方法" *日本ロボット学会誌*, **14-4** (1996) 532-537
- (11) Johann Borenstein, "The CLAPPER: A Dual-drive Mobile Robot with Internal Correction of Dead-reckoning Errors", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1994) 3085-3090
- (12) 橋本雅文 他, "モジュール型全方向移動ロボットの経路追従制御", 第12回アドバンティシンポジウム講演論文集 (1999) 83-86
- (13) Yaakov Bar-Shalom and Thomas E. Fortman, "Tracking and Data Association", *Academic Press* (1988) 150-159
- (14) 築島隆尋 他, "車輪式移動ロボットの運動学および動力学の一般理論に関する研究", *日本ロボット学会誌*, **8-6** (1991) 699-709
- (15) 酒井秀男, "タイヤ工学 -入門から応用まで-", グランプリ出版 (1987) 200-218

付録 (3)式の導出

図Aに示すように, 地上固定座標系(O - xy)における W_i の運動学は次式となる.

$$\mathbf{x}_{ai}(t+1) = \mathbf{x}_{ai}(t) + \tau \mathbf{T} \left\{ \theta_{ai}(t) + \frac{B_i(t)\tau}{2} \right\} \begin{pmatrix} A_i(t) \\ C_i(t) \\ B_i(t) \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

ただし, $\mathbf{x}_{ai} = (x_{ai}, y_{ai}, \theta_{ai})^T$ は地上固定座標系における W_i の連結点の位置ベクトルを, τ はサンプリング周期を表わす. また, $\mathbf{T}\{*\}$ は次式で定義される座標変換行列である.

$$\mathbf{T}\{*\} = \begin{pmatrix} \cos* & -\sin* & 0 \\ \sin* & \cos* & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Fig.A Notation relating to the deck module and the i -th wheel module

DM 座標系(O_o - $x_o y_o$)における連結点の位置ベクトルを $\bar{\mathbf{x}}_{ai} = (\bar{x}_{ai}, \bar{y}_{ai}, q_{ai})^T$ とする. ただし, $\bar{x}_{ai}$, $\bar{y}_{ai}$ は定数. そのとき, 地上固定座標系における DM の運動学は,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t+1) &= \mathbf{x}_{ai}(t+1) - \mathbf{T}\{6_i(t+1)\} \bar{\mathbf{x}}_{ai}(t+1) \\ &= \mathbf{x}_i(t) + \tau \dot{\theta}_i(t) \mathbf{T}_1 \begin{pmatrix} \bar{y}_{ai} \\ -\bar{x}_{ai} \\ 1 \end{pmatrix} + \tau \mathbf{T}_2 \begin{pmatrix} A_i(t) \\ C_i(t) \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

ただし, $\dot{\theta}_i(t) = B_i(t) - \dot{q}_{ai}(t)$, $\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}\{\theta_i(t) + \dot{\theta}_i(t)\tau/2\}$, $\mathbf{T}_2 = \mathbf{T}\{6_i(t) + q_{ai}(t) - \dot{q}_{ai}(t)\tau + B_i(t)\tau/2\}$.

(A.2)式の右辺は $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{u}_i$, q_{ai} , $\dot{q}_{ai}$ の関数であるから, DM の運動学は次式で表現できる.

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i(t), \mathbf{u}_i(t), q_{ai}(t), \dot{q}_{ai}(t)) \quad (\text{A.3})$$