
非ホロノミックモジュール型全方向移動ロボットの
協調制御に関する研究

(11650268)

平成11年度～平成12年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）
研究成果報告書

平成13年 3月

研究代表者 橋本雅文
(広島大学・工学部・助教授)

非ホロノミックモジュール型全方向移動ロボットの
協調制御に関する研究

(11650268)

平成11年度～平成12年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）
研究成果報告書

平成13年 3月

研究代表者 橋本雅文
(広島大学・工学部・助教授)

は し が き

本報告は平成11年度～12年度の2ヶ年にわたり科学研究費（基盤研究(C)(2), 機械工学 知能機械学・機械システム)の補助を受けて行われた研究「非ホロノミックモジュール型全方向移動ロボットの協調制御に関する研究」の成果を取りまとめたものである。

研究組織

研究代表者 橋本雅文 (広島大学・工学部・助教授)
研究分担者 大場史憲 (広島大学・工学部・教授)
研究分担者 江口 透 (広島大学・工学部・助手)

研究経費

平成11年度	2,300千円
平成12年度	1,300千円
計	3,600千円

研究発表

(1) 学会誌等

- 1) Masafumi Hashimoto, Fuminori Oba, Tohru Eguchi, Control of an Omnidirectional Vehicle with Multiple Modular Steerable Drive Wheels, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.11, No.1, pp.2-12, 1999
- 2) Masafumi Hashimoto, Takanori Kurazumi, Fuminori Oba, Odometry in Cooperative Multi-Mobile Robots system, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.11, No.5, pp.411-416, 1999
- 3) Masafumi Hashimoto, Takahiro Tomiie, Fuminori Oba, Dead Reckoning of a Modular Omnidirectional Vehicle, Proceeding of the 15th World Congress of International Measurement Confederation(IMEKO XV), CD-ROM, 1999-6
- 4) Masafumi Hashimoto, Noriaki Suize, Fuminori Oba, Path Tracking Control of a Modular Omnidirectional Vehicle, Proceeding of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'99), CD-ROM, 1999-10
- 5) 橋本雅文, 富家孝宏, 大場史憲, 冗長オドメトリ系とジャイロ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, 日本機械学会論文集C編, Vol.66, No.645, pp.1613-1620, 2000-5

- 6) Masafumi Hashimoto, Yoshiaki Furubayashi, Fuminori Oba, Dead Reckoning of a Large Outdoor AGV by Fusing Odometry and Gyro, Proceeding of 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, CD-ROM, 2000-7
- 7) 橋本雅文, 水津憲昭, 大場史憲, モジュール型全方向移動ロボットの経路追従制御法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.648, pp. 2713-2720, 2000-8

(2) 口頭発表

- 1) 橋本雅文, 富家孝宏, 藤原 勲, 大場史憲, モジュール型全方向移動ロボットのデッドレコニング, ロボティクス・メカトロニクス講演会, CD-ROM, 1999-6
- 2) 橋本雅文, 富家, 藤原 勲, 大場史憲, 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, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 243-244, 1999-9
- 3) 橋本雅文, 水津憲昭, 藤原 勲, 大場史憲, 非ホロノミックなモジュール型全方向移動ロボットの走行制御, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 233-234, 1999-9
- 4) 藤原 勲, 橋本雅文, 大場史憲, 非ホロノミックなモジュール型全方向移動ロボットの経路追従制御法, 第 8 回計測自動制御学会中国四国支部学術講演会論文集, pp.110-111, 1999-11
- 5) 古林義章, 橋本雅文, 大場史憲, オドメトリとジャイロ情報を用いた屋外大型 AGV のデッドレコニング, 第 8 回計測自動制御学会中国四国支部学術講演会論文集, pp. 162-163, 1999-11
- 6) 橋本雅文, 藤原 勲, 富家孝宏, 水津憲昭, 大場史憲, 非ホロノミックなモジュール型全方向移動ロボットの走行制御とデッドレコニング, 日本機械学会第 9 回インテリジェント・システム・シンポジウム論文集, pp.746-749, 1999-11
- 7) 橋本雅文, 古林義章, 大場史憲, オドメトリとジャイロ情報を用いた屋外大型 AGV のデッドレコニング, アドバンティ 2000 シンポジウム講演論文集, pp.33-34, 2000-1
- 8) 石田雄一, 橋本雅文, 藤原 勲, 大場史憲, 複数の能動双輪キャスタを有する全方向移動プラットフォームのデッドレコニング, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, pp.327-328, 2000-9
- 9) 秦 弘之, 橋本雅文, 大場史憲, 車体傾斜機構を有する全方向移動ロボットの走行制御に関する研究, 日本機械学会中国四国支部講演論文集, pp.179-180, 2000-10
- 10) 橋本雅文, 秦 弘之, 石田雄一, 大場史憲, 車体傾斜機構を有するモジュール型全方向移動ロボットの走行制御, アドバンティ 2001 シンポジウム講演論文集, pp.73-76, 2001-1

目 次

はしがき	i
第1章 概 論	1
第2章 デッドレコニングの設計	3
2. 1 緒言	3
2. 2 移動ロボットの概要	3
2. 3 デッドレコニング	4
2. 4 数値シミュレーション	9
2. 5 基礎実験	12
2. 6 結言	13
第3章 走行制御系の設計	16
3. 1 緒言	16
3. 2 移動ロボットの構成	17
3. 3 走行制御法	17
3. 4 基礎実験	22
3. 5 数値シミュレーション	24
3. 6 結言	25
第4章 評価実験	30
4. 1 緒言	30
4. 2 実験システムの構成	30
4. 3 走行制御系の評価実験	30
4. 4 デッドレコニング系の評価実験	31
4. 5 結言	32

第5章 車体傾斜機構を有するモジュール型全方向移動ロボットの 走行制御系とデッドレコニング系の設計	42
5. 1 緒言	42
5. 2 移動ロボットの構成	42
5. 3 主な記号	42
5. 4 走行制御法	44
5. 5 デッドレコニング	48
5. 6 走行制御系の基礎実験	51
5. 7 結言	52
第6章 モジュール型屋外全方向移動ロボットの デッドレコニング系の設計	53
6. 1 緒言	53
6. 2 AGV の構成	53
6. 3 AGV のキネマティクス	54
6. 4 デッドレコニング	57
6. 5 実験結果	58
6. 6 結言	60
第7章 結 論	62

第1章 概 論

生産工場や港湾・製鉄ヤード等において、移動搬送ロボット（AGV）を中核とした高度物流系が望まれる中で、ロボットのペイロードが使用目的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。それを解決する有効な手段として、移動ロボットの車輪をモジュールに展開しておき、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「モジュール型全方向移動ロボット」が注目されている。

モジュール型移動ロボットに関する研究は国内外で活発になされようとしているが、従来研究の多くは、制御系設計が容易なホロノミックな移動ロボットを対象としており、走行安定性や信頼性等に対して優れた非ホロノミックな移動ロボットに対する制御手法は極めて少ない。また、ニューラルネット等の創発技術に基づく制御法は移動ロボット固有のメカニズムを充分に取り扱っていないことから移動速度や制御性能を犠牲にしており、力制御に基づく制御手法も力覚センサの許容最大荷重の低さやそのコロケーション問題により移動速度や制御性能を犠牲にしている。

このような観点から、本研究では、非ホロノミックな運動拘束を有するモジュール型全方向移動ロボットに関連して、以下の項目について研究を行った。

(1) デッドレコニング系の設計

ロボットの位置とともにモジュール相互の動作干渉の要因となる車輪径を精度よく推定するデッドレコニング系をセンサーフュージョンの立場から設計する。

(2) 走行制御系の設計

デッドレコニング系からの出力情報をもとにモジュール相互の動作干渉を低減する協調制御系、ロボットを経路誘導する経路追従制御系とからなる走行制御系をモーションコントロールの立場から設計する。

(3) 評価実験

試作したモジュール型全方向移動ロボットテスト装置に対してデッドレコニング系と走行制御系とを実装し、それらの性能評価実験を行う。

(4) 車体傾斜機構を有す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系と走行制御系の設計

デッドレコニング系と走行制御系を拡張して、車体傾斜機構を装備したモジュール型全方向移動ロボットに対する手法を検討する。

(5)モジュール型屋外大型AGVのデッドレコニング系の設計

実機への展開の第1段階として、モジュール型屋外大型AGVに対するデッドレコニング系を設計する。

以下、研究項目に沿ってその研究成果を述べる。

第2章 デッドレコニングの設計

2. 1 緒 言

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あり、車輪エンコーダ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注目されている^{(1)~(3)}。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。

速度推定誤差の低減はロボットの位置誤差の軽減のみならず、速度制御を行うモジュール型移動ロボットではモジュール相互の動作干渉の低減を図る上での極めて重要な問題である。

本章では、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と基礎実験により示す。

2. 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)

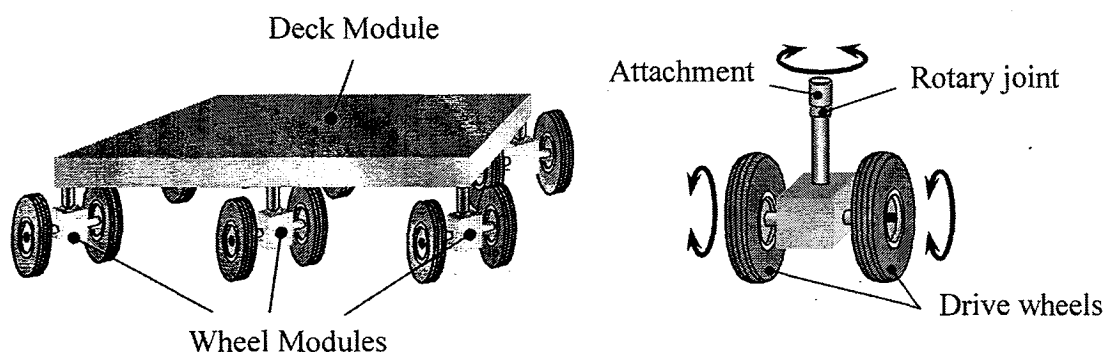


Fig.1 Overview of modular omnidirectional vehicle

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ミックな運動となり，その結果，DM の動作も非ホロ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。ロボットの走行制御系の詳細は第 3 章を参照されたい。

2. 3 デッドレコニング

2.3.1 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ダの出力情報より，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。

2.3.2 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，

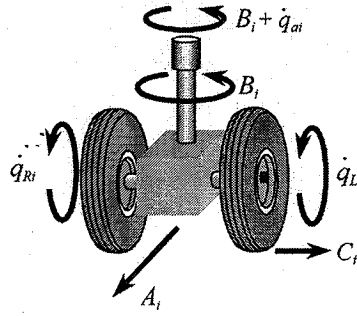


Fig.2 Notation relating to the wheel module

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

で求まり，これを以下のようにベクトル表記する．

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

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の運動学は次式でベクトル表記できる（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， $\mathbf{q}_{ai}, \dot{\mathbf{q}}_{ai}$ は旋回関節の旋回角（エンコーダ出力）と速度を表わす． $\mathbf{f}(\ast)$ は \ast 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

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

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、 $\xi_i = (\mathbf{x}_i^T, \hat{\theta}_i, \mathbf{r}_i^T)^T$ 。 $\hat{\theta}_i$ 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⁽²⁾。

2.3.3 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、 $\mathbf{F}_i = \partial \mathbf{g} / \partial \xi_i$ 、 $\mathbf{G}_i = (\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{u}_i, \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{r}_i)$ 。

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⁽⁴⁾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, $\tilde{z}_i(t) = \omega_{gyro}(t) - \hat{\theta}_i(t)$, $R_{gyro} = E\{\Delta\omega_{gyro}^2\}$,
 $K_{gyro}(t) = P_i(t)H_{gyro}^T [H_{gyro}P_i(t)H_{gyro}^T + R_{gyro}(t)]^{-1}$.

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{x}_j^+ とその誤差共分散 $P_{x_j}^+ = E\{\Delta\hat{x}_j^+ \Delta\hat{x}_j^{+T}\}$ を取得する. \hat{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.

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

ただし, $H=(1,0,0)^T$.

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.

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

$$P_i^{++}(t) = P_i^+(t) - K(t)HP_i^+(t) \quad (14)$$

ただし, $K(t) = P_i^+(t)H^T [HP_i^+(t)H^T + P_{x_j}^+(t)]^{-1}$.

上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{x}_i^+ と \hat{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.

2.3.4 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WMi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⁽¹⁾. そこで, ジャイロ情報の融合に際して, WMi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 $100\beta\%$ 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 $P_{\dot{\theta}_i}$ を用いることで, 観測残差 \tilde{z}_i の分散は理論上, $\alpha_i^2 = P_{\dot{\theta}_i}(t) + R_{gyro}(t)$ 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 $P_{\dot{\theta}_i}$ 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 $P_{\dot{\theta}_i}$ 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, WM 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 WM 中, 最も大きな旋回加速度を発生している WM をリーダー (LWM), その他の WM 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, WM 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WM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、WM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。

3章で述べるように、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WMに設けた車輪制御系（WM制御系）とからなる。LWMの決定に際してWMの旋回加速度を知ること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WM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WM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WMを引き続きLWMとする。

2. 4 数値シミュレーション

4台のWM（WM1, 3は主動WM, 2, 4は従動WM）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(5)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(6)を引用した。

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。

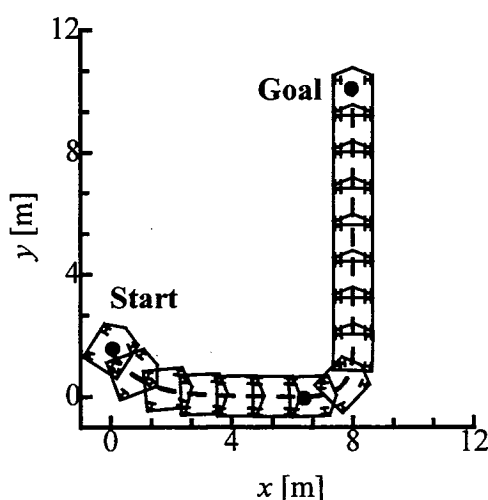


Fig.3 Simulation model

ジャイロ出力の特性としては、次節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。

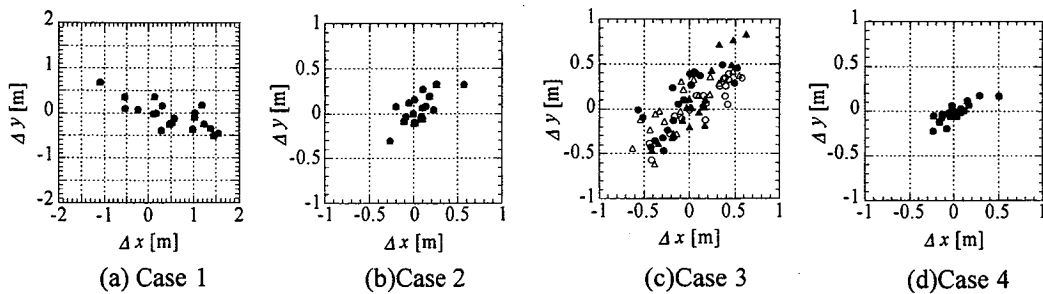


Fig.4 Error in position estimate at goal (○:WM1, ●:WM2, △:WM3, ▲:WM4)

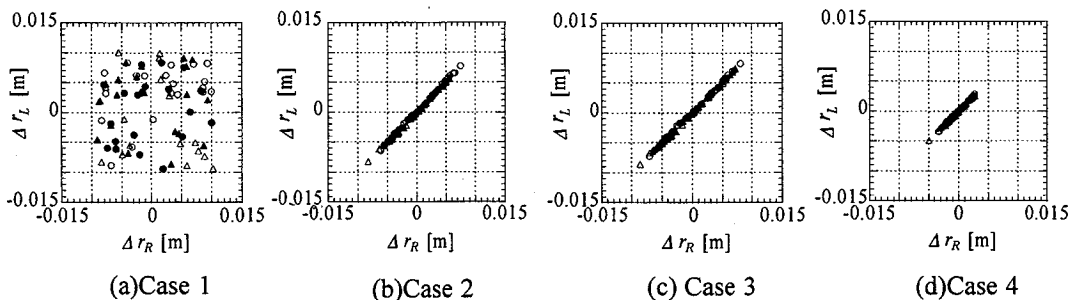


Fig.5 Error in estimate of wheel radius at goal (○:WM1, ●:WM2, △:WM3, ▲:WM4)

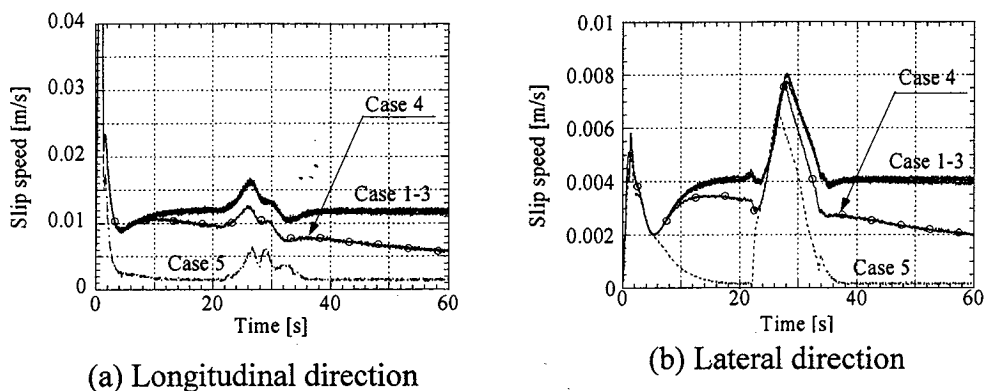


Fig.6 Slip speed of active wheel module (RMS value)

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

ロボットは 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、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。

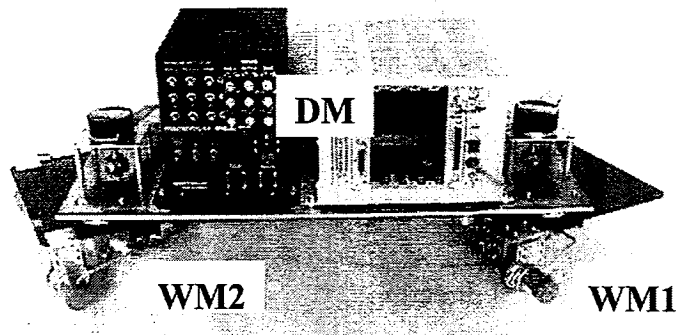


Fig.7 Overview of experimental vehicle

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。

2. 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 $R_A=2.25 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^2$, $R_C=6.4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^2$, $R_{B,small}=5 \times 10^{-5}$, $R_{B,large}=0.5 \text{rad}^2/\text{s}^2$, $R_{r,small}=0$, $R_{r,medium}=4 \times 10^{-10}$, $R_{r,large}=2.5 \times 10^{-9} \text{m}^2$ 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.

2.6 結 言

本章では, 非ホロミック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基礎実験により提案手法の有効性を示した.

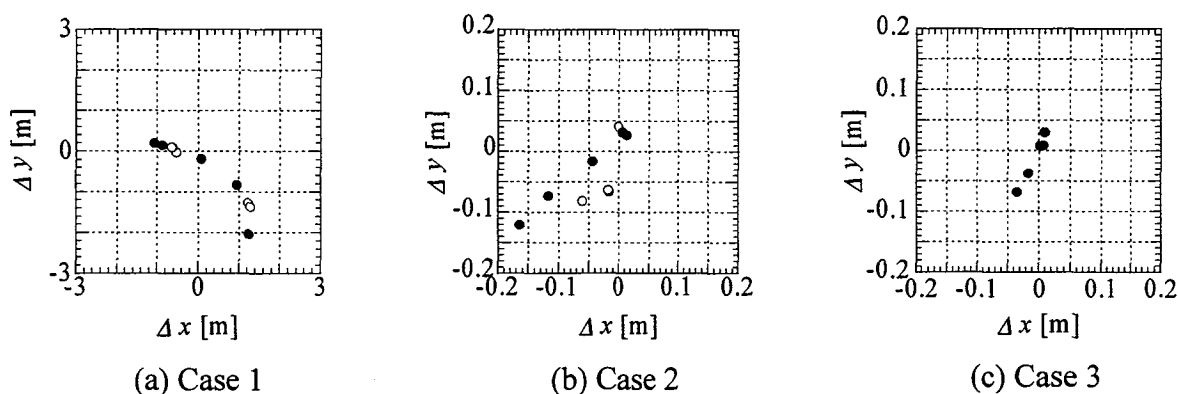


Fig.8 Error in position estimate at goal (○:WM1, ●:WM2)

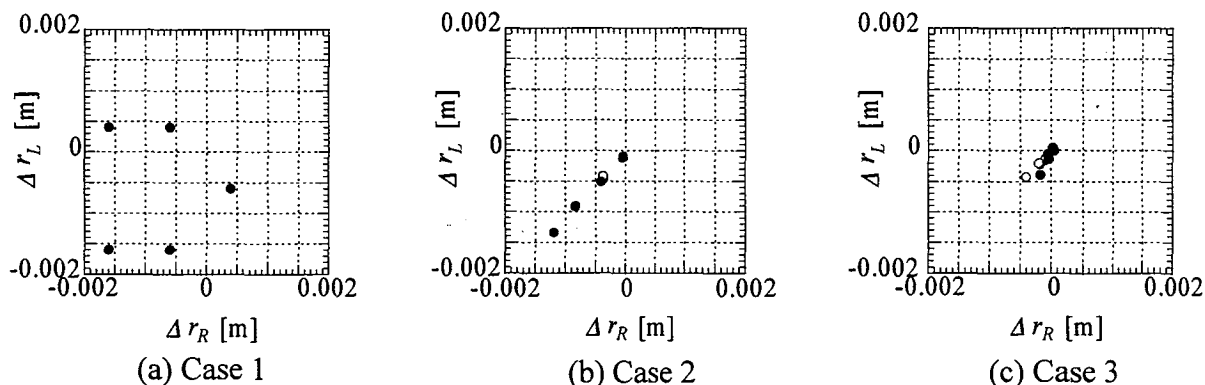


Fig.9 Error in estimate of wheel radius at goal (○:WM1, ●:WM2)

参考文献

- (1) 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
- (2) 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
- (3) 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
- (4) Yaakov Bar-Shalom and Thomas E. Fortman, “Tracking and Data Association”, *Academic Press* (1988) 150-159
- (5) 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
- (6) 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WM*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WM*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.

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

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,

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

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

(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。

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

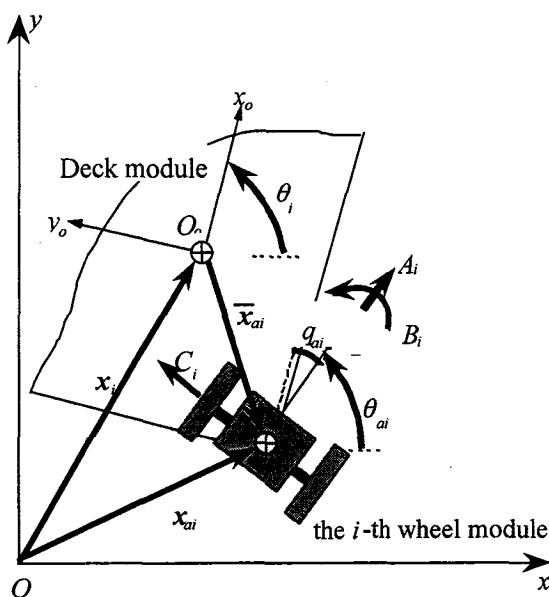


Fig.A Notation relating to the deck module and the i -th wheel module

第3章 走行制御系の設計

3.1 緒言

移動ロボットの目標経路に対する横偏差と姿勢の2自由度を制御して、目標経路にロボットを追従させる走行制御は、ロボットにおける重要な制御問題のひとつである。全ての車輪がひとつの瞬時回転中心まわりに整合性のとれた運動を行う必要がある非ホロミックなモジュール型全方向移動ロボットでは、走行制御系として、車体の目標経路に対する横位置・姿勢偏差情報をもとに経路追従を実現する車体の目標運動を決定する車体制御系（経路追従制御系）と、その情報をもとに各車輪の協調運動を制御する車輪制御系（協調制御系）とからなる階層型の走行制御系が効果的となる。

非ホロミック型全方向移動ロボットの走行制御系の議論は、車輪制御系の設計が中心であり、車体制御系としては、車体の位置・姿勢偏差が微小として線形化に基づく古典的な制御系設計法が見られる程度⁽¹⁾で、車体の位置・姿勢偏差が大きい場合、車体を目標経路に向かわせる経路計画が必要となるなどの欠点がある。

他方、車輪制御系では、複数の車輪の制御誤差に伴い生じる車輪のスリップを軽減するため、Reisterら⁽²⁾の一種の位置と力のハイブリッド制御法、Borenstein⁽³⁾の車輪ユニットへのメカニカルなコンプラインス機構の導入、Hashimotoら⁽⁴⁾の力覚センサ情報に基づく力制御法などが提案されている。しかし、Reisterらの方式は、全ての車輪の操作量を1台の計算機で集中的に決定する必要があることから、車輪ユニットの台数の増加につれて実時間制御が困難となる。Borensteinの方法は2台の車輪ユニットに議論を限定している。また、力制御に基づく方法は、制御に必要とされる車体や搬送物に関する質量等の慣性パラメータの正確な推定が、現実的には困難と思われる。

本章では、非ホロミックなモジュール型全方向移動ロボットの走行制御に関して、車体の目標経路に対する位置・姿勢偏差が大きい場合でも、車体を目標経路に向かわせる経路計画を不要とする車体制御系（経路追従制御系）、車体や搬送物に関する質量等の慣性パラメータが不正確な場合でも車輪の滑りを軽減して車体の目標運動を実現する車輪制御系（協調制御系）を設計し、それらの有効性を基礎実験と計算機シミュレーションにより示す。

3. 2 移動ロボットの構成

図1のように、移動ロボットは車体モジュール (DM) と複数の車輪モジュール (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 の許容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より WM の台数が定まりロボットが構築できる。

WM は機構的に左右独立駆動輪を持ち、自由旋回関節を介して DM の下部と連結する。WM は左右駆動輪、旋回軸に設けたエンコーダによりそれぞれ車輪回転角、旋回角を計測でき、左右駆動輪の回転速度の制御により連結点の速度とその方向を指示できる。

3. 3 走行制御法

3.3.1 制御系の概要

WM のステアリング旋回軸は駆動輪の車軸中点上に位置することから、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。そのため、WM が滑らずに走行するには、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、移動ロボットの動作はアッカーマン幾何学に従うよう制御する。すなわち、車体制御系 (DM 制御系) では目標経路に追従させる DM の瞬時旋回中心位置と目標速度を定め、各 WM 制御系に送信する。他方、各車輪制御系 (WM 制御系) では、その情報をもとに連結点のアッカーマン幾何学に従うような目標進行速度、自由関節の目標角度を定め、左右駆動輪を制御する。なお、走行開始に際して、全ての WM は車輪の向きを (ほぼ) そろえる準備動作を完了しているものとする。

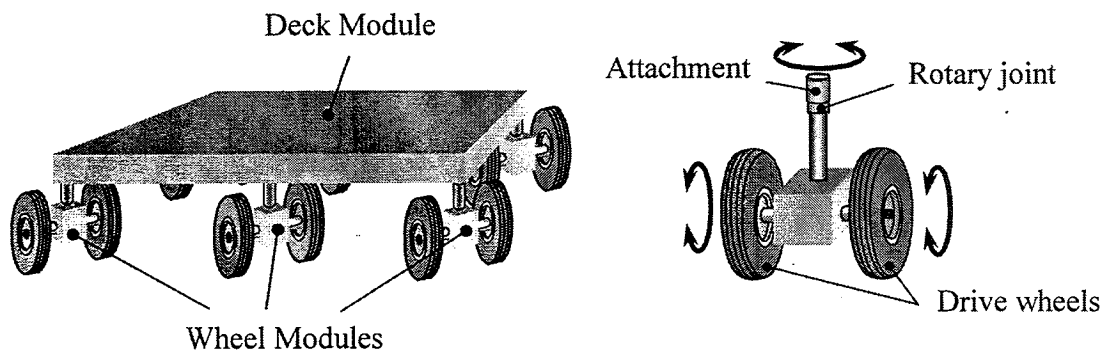


Fig.1 Overview of modular omnidirectional vehicle

3.3.2 DM 制御系（経路追従制御系）

図2に示すように、DM の中心 O_o を原点、機首方向を x_o 軸として DM に固定した座標系を $\Sigma_o(O_o - x_o, y_o)$ とする。また、 O_o 点から目標経路へ下ろした垂線の足 O_p を原点、目標経路の接線方向を x_p 軸として目標経路に固定した座標系を $\Sigma_p(O_p - x_p, y_p)$ とする。経路追従制御の制御量は Σ_p における DM の横位置 y_o と姿勢 θ_o 、操作量は C_{ICR} と Σ_o における ICR の方位角 ϕ_{ICR} である。

DM の横位置と姿勢に関する運動学式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_o}{dx} &= \tan \phi_{dir} \\ \frac{d\theta_o}{ds} &= C_{ICR} - \frac{C_{ref} \cos \phi_{dir}}{1 - C_{ref} y_o} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 s は DM の初期位置からの進行距離、 x は目標経路に沿った DM の進行距離、 t は時間を表わす。 ϕ_{dir} は Σ_p における DM の進行方位、 C_{ICR} は DM の旋回曲率、 C_{ref} は目標経路の曲率。第2式の右边第2項は DM の進行に伴う目標経路方位の変化量を示す。

いま、DM の進行に伴い、その横位置 y_o 、姿勢偏差 θ_o を次式の挙動に従い、それぞれ0、目標姿勢 θ_o^* に収束させる。

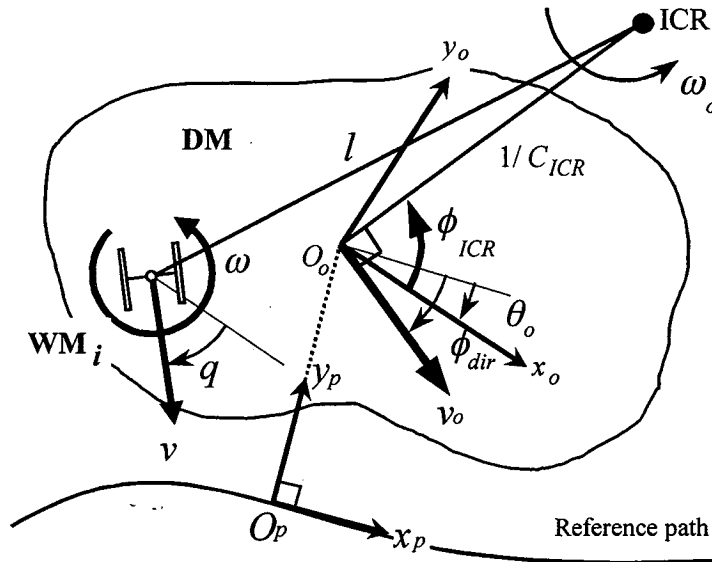


Fig.2 Notation relating to path tracking control

$$\frac{dy_o}{dx} + K_y y_o = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_o}{ds} + K_\theta (\theta_o - \theta_o^*) = 0 \quad (3)$$

ただし, K_y , K_θ はゲイン定数.

(1)式ならびに $\phi_{ICR} = \phi_{dir} - \theta_o + \pi/2$ を考慮することで, 上式の挙動を実現する C_{ICR}^* と ϕ_{ICR}^* は次式となる.

$$\phi_{ICR}^* = \arctan(-K_y y_o) - \theta_o + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

$$C_{ICR}^* = K_\theta (\theta_o^* - \theta_o) + \frac{C_{ref} \cos \phi_{dir}}{1 - C_{ref} y_o} \quad (5)$$

なお, 経路追従制御では, DM の進行速度 $v(=ds/dt)$ の目標値 v_o^* は任意に与えられる.

さて, (3)式では DM の目標姿勢を Σ_p で記述しているため, 目標姿勢が経路進行方向と従属な関係を取る場合は便利であるが, DM の目標姿勢を地上固定座標系 Σ_w で直接指定したい場合は不便である. そこで, そのような場合は, 次式に基づき目標姿勢の挙動を定める.

$$\frac{d{}^w\theta_o}{ds} + K_\theta ({}^w\theta_o - {}^w\theta_o^*) = 0 \quad (6)$$

ただし, ${}^w\theta_o^*$, ${}^w\theta_o$ は Σ_w における目標姿勢, 現在姿勢.

(6)式を実現する C_{ICR}^* は $C_{ICR}^* = K_\theta ({}^w\theta_o^* - {}^w\theta_o)$ となる. また, スピンターン (その場旋回) モードでは DM の目標旋回速度 ω_o^* を直接, DM 制御系より指示する.

なお, DM の運動は WM により実現されることから, 実際には WM 制御系の特性を定めた後, DM 制御系のゲイン K_y , K_θ を決めることになる.

3.3.3 WM 制御系 (協調制御系)

各 WM 制御系は DM 制御系が算出した目標動作 (v_o^* , C_{ICR}^* , ϕ_{ICR}^*) をもとに, WM が瞬時旋回中心(ICR)を真横に見る角度 q^* , ICR 回りの角速度 $\omega_o^* = C_{ICR}^* v_o^*$ に ICR までの直線距離 l をかけた目標速度 $v^* = l\omega_o^*$ を算出する. そして, 現在の速度 v , 旋回角 q (旋回関節のエンコーダ出力) をそれら目標値と一致するよう制御する.

いま, WM の公称動力学モデルを以下で定義する (付録参照).

$$\dot{v} = Av + BV \quad (7)$$

ただし、 $v = (v, \omega)^T$ は WM の進行速度，旋回速度， $V = (V_L, V_R)^T$ は WM の左右駆動輪へのモータ指令電圧で， A ， B は以下で示す慣性行列，トルクゲイン行列．

$$A = \begin{pmatrix} A_v & 0 \\ 0 & A_q \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_v & B_v \\ B_q & -B_q \end{pmatrix}$$

速度制御と操舵制御に関するモータへの指令電圧 V_v ， V_q を

$$V_v = K_{v1}v^* + K_{v2}e_v + K_{v3}\int e_v dt \quad (8)$$

$$V_q = K_{q1}\omega + K_{q2}e_q + K_{q3}\int e_q dt \quad (9)$$

ただし， $e_v = v^* - v$ ， $e_q = q^* - q$ ． $K_{v1} \sim K_{q3}$ はゲイン定数．
で求め，それらの和をモータ指令電圧とする．

$$V = V_v + V_q \quad (10)$$

(8),(9)式におけるゲイン定数は(7)式の公称動力学モデルをもとに定める．具体的には，速度制御に関しては目標速度がステップ状に変化するとして，他方，操舵制御に関しては WM の目標姿勢がランプ状に変化するとして，公称動力学モデルの拡大系を構築し，最適レギュレータ問題に帰着させることで，ゲイン $K_{v2} \sim K_{q3}$ が得られる．フィードフォワード量のゲイン K_{v1} は，(7)式より $K_{v1} = (-A_v/2B_v, -A_v/2B_v)^T$ となる．

積載物の重量や路面状況の変化，WM 間の動学的な相互干渉により，WM の実際の動力学モデルは公称モデルとは異なる．そこで，公称モデルに対して設計した(8)～(10)式の制御系を実モデルに対しても適用可能とするため，実モデルが公称モデルと一致するように補償する．いま，公称モデルと実モデルとの差異を外乱 T_{dis} とすると，実モデルは

$$\dot{v} = Av + BV + T_{dis} \quad (11)$$

と記述でき，外乱は次式で推定できる⁽⁴⁾．

$$\begin{aligned} \hat{T}_{dis} &= \lambda\{\dot{v}\} - Av - BV_{cmd} \\ &= -\lambda\{gv\} + gv - Av - BV_{cmd} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 V_{cmd} はモータ制御入力。 $\lambda\{*\}$ は伝達関数 $g/(s+g)$ を有する一次ローパスフィルタからの $\{*\}$ の出力である。

従って、外乱を打ち消し、実モデルを公称モデルと一致させるモータ操作量は以下となる。

$$V_{cmd} = V - B^{-1}\hat{T}_{dis} \quad (13)$$

なお、実モデルと大きく異なる公称モデルを選定すると、外乱 T_{dis} は大きくなるため過大な操作量が必要となる。そうした場合、操作量の飽和や車輪に滑りが発生する可能性がある。そのため、現実的には実モデルと大きく異なる公称モデルを採用できないことから、標準的な積載物を DM に搭載した場合に対して WM をモデル化したものを公称モデルとする。

3.3.4 主動 WM と従動 WM

(8)式の速度制御に必要な WM の現在速度ベクトル v は以下で算出される。

$$v = \begin{pmatrix} \frac{r_R}{2} & \frac{r_L}{2} \\ \frac{r_R}{d} & -\frac{r_L}{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_R \\ \dot{q}_L \end{pmatrix} = J\dot{q}_{wheel} \quad (14)$$

ただし、 \dot{q}_{wheel} は車輪エンコーダの出力より計算される WM の左右駆動輪の回転速度、 $r = (r_R, r_L)^T$ は左右駆動輪の車輪半径、 d はトレッド長。

車輪径 r は DM の積載荷重、車輪の空気圧等により変化することから、公称車輪径と実車輪径の差異により、(14)式で算出される速度 v にはバイアス誤差が生じ、WM 制御系内での速度偏差 e_v は不正確となる。そのため、速度制御系では目標速度 v^* が実現できたつもりでいても、実際の対地速度は v^* にはなっておらず、その結果、DM の WM 連結点の速度と WM の発生速度との間に差が生じ、車輪が滑る。DM の運動は複数 WM の駆動力により定まることから、一般的に駆動力を発生する WM の台数が増加するほど滑る可能性は増大する。

そこで、車輪の滑りを軽減するため、速度制御に関する WM として主動 WM と従動 WM との 2 種類を構成する。主動 WM は DM の動作を決定する駆動輪の役割を担い、目標速度を v^* として速度制御する。他方、従動 WM は主動 WM の運動により定まる DM の動作に従うよう速度制御する。すなわち、従動 WM は単に DM の荷重

分散を担う受動的なキャストの役割を果たす。なお、DM の任意の運動を実現するには少なくとも2台の主動WMが必要となる。

DM の WM 連結点と WM との運動の矛盾は結果的に WM の公称モデルにおける外乱となって現れることから、(12)式により推定される WM 進行方向の外乱 $\hat{T}_{v,dis}$ に倣うように WM の進行速度を制御することで従動 WM を実現する。すなわち、従動 WM の本来の目標速度 v^* を $\hat{T}_{v,dis}$ に応じて以下のように修正する。

$$v_{mod} = v^* + \int \hat{T}_{v,dis} dt \quad (15)$$

従動WMの導入によりWM相互の力学的干渉が軽減するため、間接的に主動WMの滑りも減少することが期待できる。なお、従動WMの代わりとして単に受動キャストを使用することも考えられる。こうした場合、受動キャストには走行路面抵抗や車軸回りの粘性抵抗など様々な抵抗力が生じ、それらに対抗する駆動力も主動WMが発生する必要がある。しかし、従動WMではそれら抵抗力を自ら解消するため、主動WMの負担が軽減できる。また、走行状態に応じて、制御により主動WMと従動WMを動的に切替えることで、車輪の滑りを軽減しながら走行安定性を向上させることも期待できる。

3. 4 基礎実験

DM制御系の有効性を知るため、図3のように2台のWMからなる移動ロボットを製作した。WMとしては、前方のステアリング輪と後方の左右独立駆動輪との3車輪からなる市販の教材用移動ロボットを用いた。ステアリング輪が、左右独立駆動

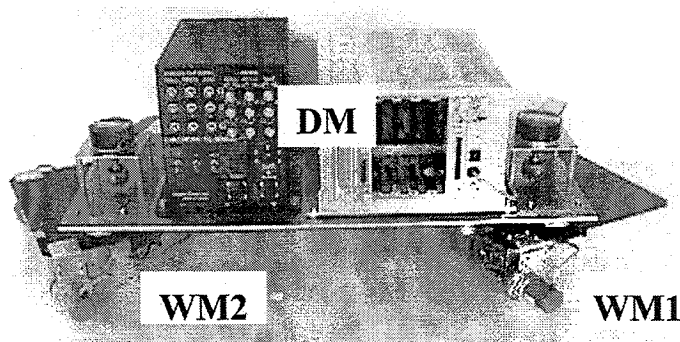


Fig.3 Overview of experimental vehicle

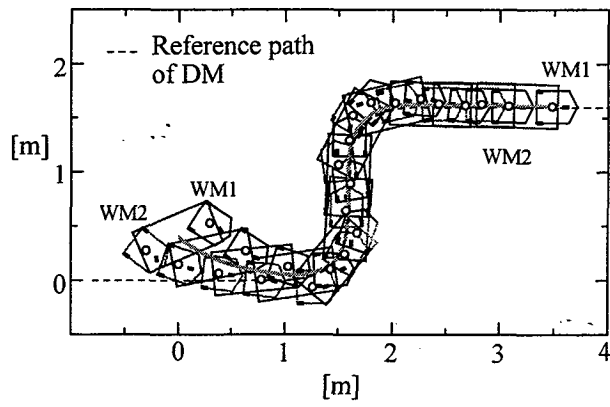
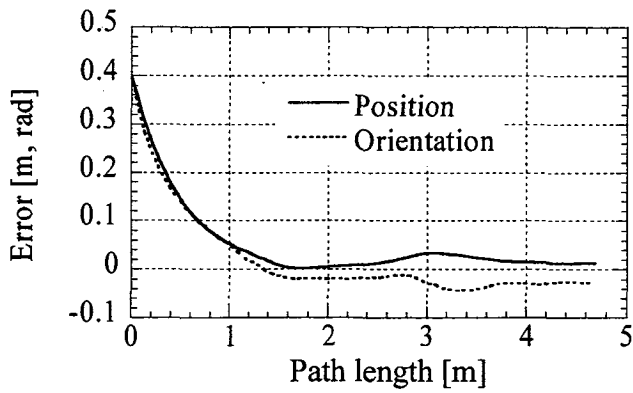
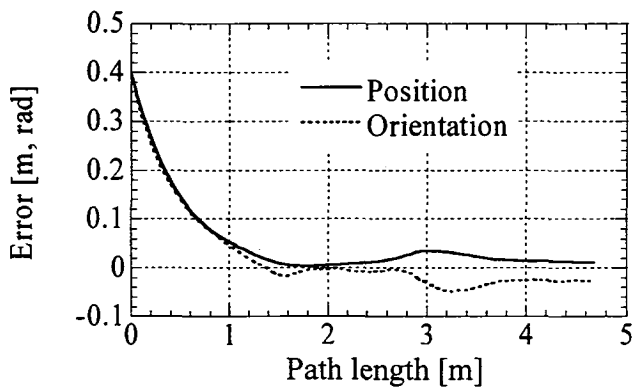


Fig.4 Reference path of DM and motion of controlled vehicle



(a) DM speed: 0.08m/s



(b) DM speed: 0.16m/s

Fig.5 Error in lateral position and orientation of DM

輪の制御の不安定さを補う役割を果たしていることから、WM制御系では(12)式の外乱オブザーバを施していない。

初期位置偏差，姿勢偏差を0.4m，0.4radとして，ロボットを直線と曲線の組合わせからなる目標経路上を走行させた。2台のWMはともに主動WMである。制御周期は10ms，ゲイン定数は $K_y=K_\theta=2\text{m}^{-1}$ とした。2つの曲線経路はともに直線経路との接続点が1回微分可能となる次式の関数で記述し，DMの目標姿勢は目標経路の接線方向とした。

$$\begin{cases} x = \rho \cos^{0.6} \alpha \\ y = \rho \sin^{0.6} \alpha \end{cases} \quad (0 \leq \alpha \leq \pi/2 \text{ rad}) \quad (16)$$

ただし， $\alpha = 0$ ， $\alpha = \pi/2$ はそれぞれ曲線経路の入口，出口の角度である。また， $\rho=0.8\text{m}$ でその結果，曲線の最小曲率半径は0.4mとなる

DMとWMの走行の様子を図4に示す。図5(a)(b)はそれぞれDMの目標速度が0.08m/s，0.16m/sの場合の目標経路に対するDMの追従誤差を示す。いずれの速度においても，DMは直線経路を約2m進行するまでに横方向，姿勢方向ともほぼ目標経路に収束している。DMの最終的な位置偏差が0.01m，姿勢偏差が0.02radとなっているのは，実験装置のエンコーダ等の取り付け誤差によるものと思われる。

3. 5 数値シミュレーション

DM制御系とWM制御系からなる走行制御系の総合的な有効性を見るため，4台のWMからなるロボットを図6に示す経路に沿って走行させた。DMの初期位置偏差，姿勢偏差は1.5m，1.0radで，1秒間の加速の後，0.3m/sの一定速度で走行させた。曲線経路は $\rho=2\text{m}$ として(16)式で与えた。車輪エンコーダ，旋回関節エンコーダの分解能はそれぞれ，先に示した実験装置と同様の10000パルス/回転，4096パルス/回転とした。外乱オブザーバでの外乱推定周期は10ms，それ以外の制御周期は50msである。 $K_y=K_\theta=2\text{m}^{-1}$ ， $g=20\text{s}^{-1}$ とした。

ロボットの動的モデルは文献(5)の方法により記述し，タイヤ車輪と路面との間の動的モデルは文献(6)を引用した。そのため，ロボットの加減速や曲線経路走行時には，車輪に滑りが生じている。

各WMの公称モデルは実モデルに対して27%の誤差を持つ。各WMの公称車輪径は10cm，実車輪径はWM1,2では9.0cm，WM3,4では9.5cmとした。以下の2通りの条件でシミュレーションを行った。

Case 1) 全てのWMが主動WMの場合

Case 2) WM1,3が主動WM, WM2,4が従動WMの場合

Case1)~2)に対する結果を図7, 8に示す。(a)は目標経路に対するDMの横位置, 姿勢偏差, (b)は各WMの操舵角の制御誤差, (c)は車輪回転数に実車輪径を乗ずることによって得られるWMの真の速度と目標速度との差(速度出力誤差)である。経路長6~9mあたりでロボットは左折経路上を走行している。(d), (e)はWMの縦滑り, 横滑り速度を表わす。ここで, 滑り速度は4台のWMの実車輪径の相対的な大きさに依存するため, 統計的に評価した。すなわち, 各WMの実車輪径の大きさを9cmから11cmの間で一様乱数を発生させて目標経路を20回走行させた時のWM1,3とWM2,4の滑りのRMS値により評価した。

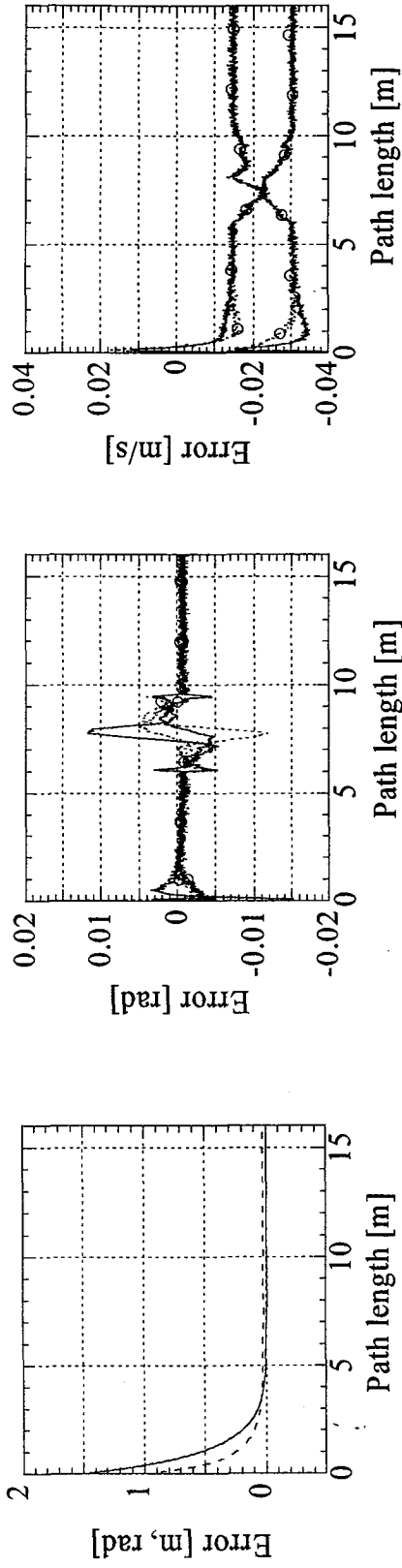
図7, 8いずれにおいてもWMの操舵角は正確に制御でき, DMも目標経路に誘導できる。各WMは公称車輪径をもとに(14)式より観測される速度をもとに制御することからWM制御系で速度偏差 $e_v = 0$ が実現できたつもりであるが, 公称車輪径と実車輪径の差異により実際には図7(c)のような速度偏差が生じる。その結果, 図7(d)のように車輪に縦滑りが発生する。なお, 左折中に滑りが増加するのは車輪にスリップ角が生じるためである。

従動WMを導入した場合(case2)では, 従動WMがDMの発生速度に倣うことから, 図8(d)のように従動WMの縦滑りが大きく軽減されるとともに, WM相互の力学的干渉が軽減するため, 主動WMの縦滑りも減少する。なお, 従動WMの縦滑り速度は, 公称車輪径と実車輪径を一致させた場合(すなわち, 速度計測が正確にできる場合)のWMの縦滑り速度とほぼ一致することを確認している。

3. 6 結 言

本章では, 非ホロノミックなモジュール型全方向移動ロボットに関して, 目標経路に対する横偏差と姿勢の2自由度を制御して, 目標経路にロボットを追従させる走行制御法を提案した。主な結果を以下に示す。

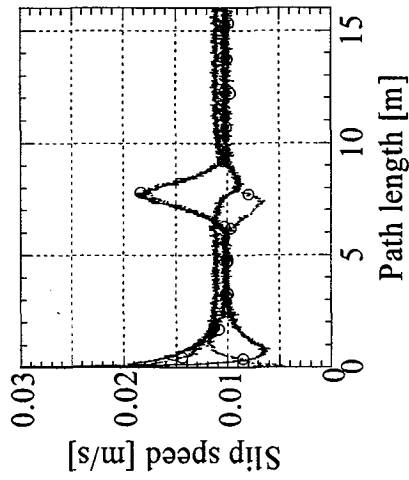
- (1)全ての車輪モジュールがひとつの瞬時回転中心まわりに整合性のとれた運動が行える車体制御系(経路追従制御系)と車輪制御系(協調制御系)からなる走行制御系を提案した。
- (2)車体の目標経路に対する位置・姿勢偏差が大きい場合でも車体制御が可能な経路追従制御系をアッカーマン幾何学と非線型制御系をもとに設計した。
- (3)車体や搬送物に関する質量等の慣性パラメータが不正確な場合でも車輪の滑



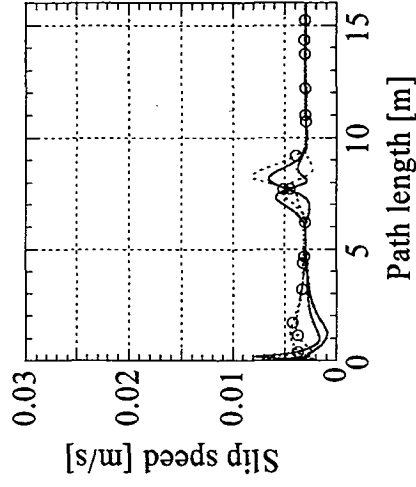
(a) Error in lateral position and orientation of DM

(b) Error in steering angle of WM

(c) Error in velocity of WM



(d) Longitudinal slip velocity of WM (RMS value)



(e) Lateral slip velocity of WM (RMS value)

Fig.7 Simulation result in the case 1. In (a), solid and dotted lines represent errors in lateral position and orientation, respectively. In (b)-(e), solid line and dotted line with circle marks represent the results in WM1 and 3 and in WM 2 and 4, respectively.

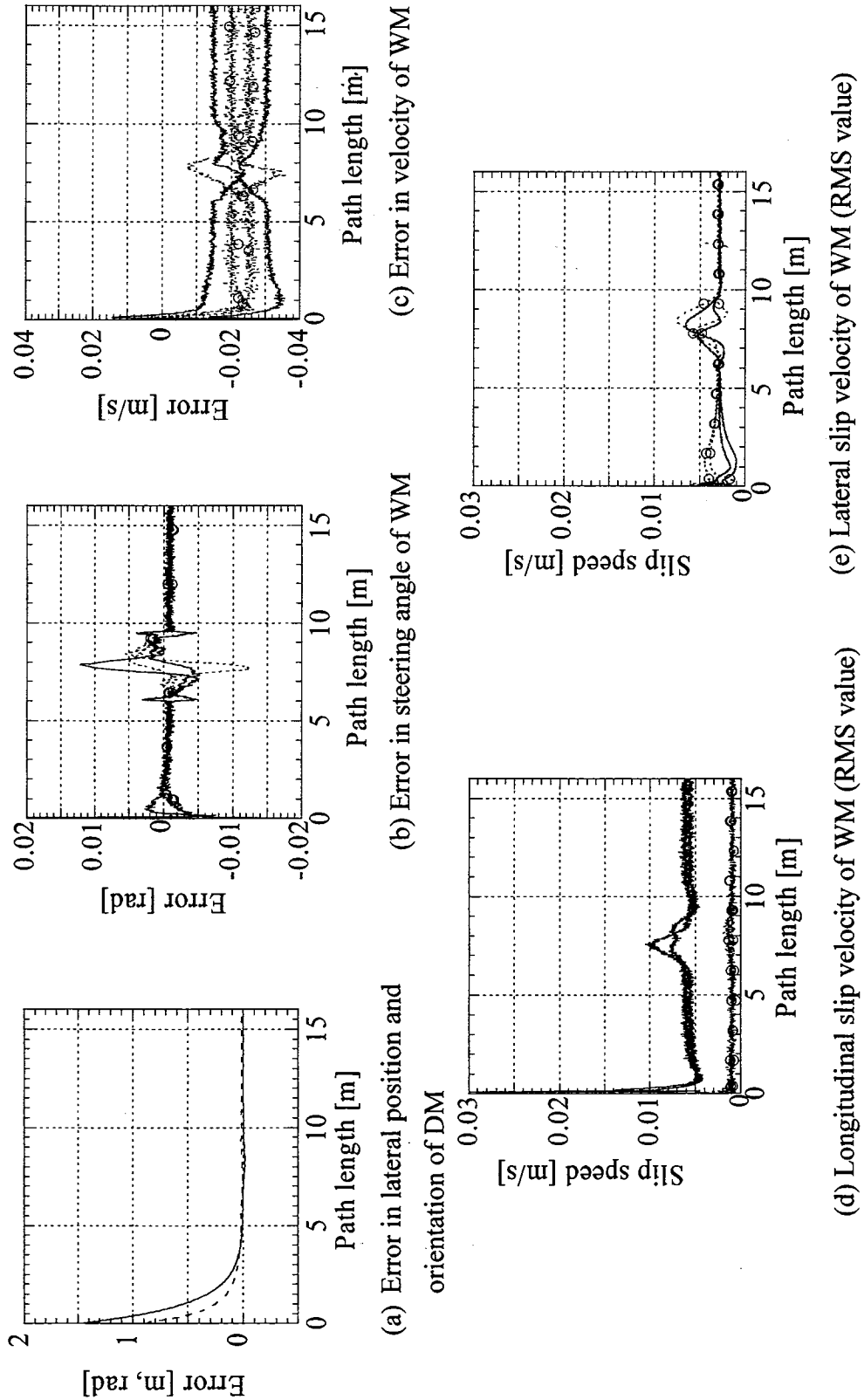


Fig.8 Simulation result in the case 2. In (a), solid and dotted lines represent errors in lateral position and orientation, respectively. In (b)-(e), solid line and dotted line with circle marks represent the results in active wheels (WM1 and 3) and in passive wheels (WM 2 and 4), respectively.

りを軽減して車体の目標運動を実現する主動WMと従動WMからなる協調制御系を設計した。

(4)基礎実験ならびに数値シミュレーションにより提案手法の基本的な有効性を示した。

提案手法において、車輪の滑りを軽減するとともにロボットの走行安定性を確保するには、主動WMと従動WMを適切に配置することが必要となる。主動WMと従動WMの適切な配置の検討、走行経路等の走行状態に応じたそれらWMの動的な切替え法の確立が今後の課題として残されている。

参考文献

- (1) 新井,機械技術研究所報告第138号(1987)
- (2) J.Borenstein, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **11-1** (1995) 21-35
- (3) M.Hashimoto et al., *Proc. of Int. Symp. on Advanced Vehicle Control 1998 (AVEC'98)* (1998) 761-766
- (4) 大西, 機械の研究, **45-1** (1993) 1-18
- (5) 築島他, 日本ロボット学会誌, **8-6** (1991) 699-709
- (6) 酒井, 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 WMの公称動力学モデルの導出

いま, n 台のWMからなるロボットを考え, DMに標準的な積載物を搭載した場合のDMと積載物との質量の総和を m_0 とする。WMの公称動力学モデルでは, 各WMにかかる静的な垂直荷重 (m_0/n) を考慮する。

WMの公称動力学の導出に際しては平面運動のみを考え, 車輪への垂直荷重は運動中一定, すなわちロール, ピッチ運動は無視する。さらに, 車輪は滑らないとすると, WMの進行運動と旋回運動に関する運動方程式は以下となる。

$$M\dot{v} = (J^{-1})^T \tau + f \quad (\text{A-1})$$

ただし, $v = (v, \omega)^T$ はWMの速度・角速度, $\tau = (\tau_R, \tau_L)^T$ は左右車輪の駆動トルク, $f = (f_v, f_\omega)^T$ はWMがDMから受ける力/トルクで, J は左右駆動輪の車輪半径 $r = (r_R, r_L)^T$ やトレッド長 d より決まる(14)式の行列。慣性行列 M は, WM本体の質量, 慣性モーメントを m_a, I_a , 左右車輪の質量, 慣性モーメントを m_R, I_R, m_L, I_L とすると,

$$M = \begin{pmatrix} \frac{m_o}{n} + m_a + m_R + m_L & \frac{d}{2}(m_R - m_L) \\ \frac{d}{2}(m_R - m_L) & I_a + I_R + I_L + (m_R + m_L)\frac{d^2}{4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_v & m_{vq} \\ m_{vq} & m_q \end{pmatrix}$$

他方，左右駆動輪の車軸回りの回転運動に関する動力学は次式となる．

$$G_m \ddot{q}_{wheel} + G_d \dot{q}_{wheel} + \tau = G_k V \quad (A-2)$$

ただし， $\dot{q}_{wheel} = (\dot{q}_R, \dot{q}_L)^T$ は左右車輪の回転速度， $V = (V_R, V_L)^T$ は左右車輪モータへの入力電圧， $G_m = \text{diag}(G_m, G_m)$ ， $G_d = \text{diag}(G_d, G_d)$ ， $G_k = \text{diag}(G_k, G_k)$ はそれぞれ，左右車輪の慣性，粘性，トルクゲイン．

(14)式，(A-1)，(A-2)式より，WMの動力学モデルは，

$$D_1 \dot{v} = D_2 v + D_3 V + f \quad (A-3)$$

ただし， $D_1 = M + G_m (J^{-1})^T J^{-1}$ ， $D_2 = -G_d (J^{-1})^T J^{-1}$ ， $D_3 = G_k (J^{-1})^T$ ．

上述してきた諸変数の公称値には ($\hat{\quad}$) をつけ， $D_1 = \hat{D}_1 + \Delta D_1$ ， $D_2 = \hat{D}_2 + \Delta D_2$ ， $D_3 = \hat{D}_3 + \Delta D_3$ とすると，(A-3)式は，

$$\hat{D}_1 \dot{v} = \hat{D}_2 v + \hat{D}_3 V + f - [\Delta D_1 \dot{v} - \Delta D_2 v - \Delta D_3 V] \quad (A-4)$$

公称値においては左右車輪の半径が等しい ($\hat{r} = \hat{r}_R = \hat{r}_L$)，質量が等しい ($\hat{m} = \hat{m}_R = \hat{m}_L$) として $A_v = -2\hat{G}_d / (\hat{r}^2 \hat{m}_v + 2\hat{G}_m)$ ， $A_q = -\hat{d}^2 \hat{G}_d / (2\hat{r}^2 \hat{m}_q + \hat{d}^2 \hat{G}_m)$ ， $B_v = \hat{r} \hat{G}_k / (\hat{r}^2 \hat{m}_v + 2\hat{G}_m)$ ， $B_q = \hat{r} \hat{d} \hat{G}_k / (2\hat{r}^2 \hat{m}_q + \hat{d}^2 \hat{G}_m)$ ， $T_{dis} = \hat{D}_1^{-1} [f - (\Delta D_1 \dot{v} - \Delta D_2 v - \Delta D_3 V)]$ を定義すると，(A-3)式は以下となる．

$$\dot{v} = \begin{pmatrix} A_v & 0 \\ 0 & A_q \end{pmatrix} v + \begin{pmatrix} B_v & B_v \\ B_q & -B_q \end{pmatrix} V + T_{dis} \quad (A-5)$$

(A-5)式中の T_{dis} を無視することで，(7)式の公称動力学モデルが得られる．

第4章 評価実験

4.1 緒言

第2章、3章ではモジュール型全方向移動ロボットのデッドレコニング系の設計、走行制御系の設計を行い、その性能評価を数値シミュレーションを主に行った。本章では、4台の車輪モジュールからなる試作ロボットにデッドレコニング系、走行制御系を実装して実験を行い、それらの性能評価を行う。

4.2 実験システムの構成

図1に試作した実験システムの構成を、表1にハードウェアの主な仕様を示す。移動ロボットの大きさは 925mm(長さ) x 910mm(幅) x 595mm(高さ)、重量は約 49kgで、1台の車体モジュール(DM)と4台の車輪モジュール(WM)からなる。各WMは操舵輪と左右独立駆動輪の計3輪を有し、自由旋回関節を介してDMと接続される。操舵輪と左右独立駆動輪のアクチュエータには直流モータを用い、操舵輪にはセンサとしてポテンショメータを、左右独立駆動輪にはインクリメンタル型エンコーダを、自由旋回関節にはアブソリュート型エンコーダを設けている。移動ロボットのアクチュエータ総数は12(=3x4台)、センサ総数は16(=4x4台)である。また、DMにはその旋回速度を計測するジャイロを搭載している。

移動ロボットはメモリ結合された4台のパソコンにより制御される。各WMのセンサ情報、DMに搭載したジャイロからの角速度情報はインターフェースを介してパソコンに入力され、アクチュエータへの指令値はRS232Cを介して出力される。

4.3 走行制御系の評価実験

実験システムにおける走行制御系の構成を図2に示す。車輪モジュール制御系はそれぞれ、1台のパソコンにより制御され、車輪モジュール1の制御系は車体制御系も兼ねている。

主動車輪モジュールと従動車輪モジュールとからなる協調制御系の有効性は、第2、3章の数値シミュレーションにより示したが、本実験システムの不備によりその有効性は立証できなかった。そのため、以下の実験では4台のWMを全て主動WMとした。

第3章では、経路追従制御系における瞬時回転中心の位置は、

$$\phi_{ICR}^* = \arctan(-K_y y_o) - \theta_o + \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$C_{ICR}^* = K_\theta (\theta_o^* - \theta_o) + \frac{C_{ref} \cos \phi_{dir}}{1 - C_{ref} y_o} \quad (2)$$

で定めたが、本実験システムでは、経路追従精度を向上させるため、以下のように積分動作を付加している。

$$\phi_{ICR}^* = \arctan(-K_{y1} y_o - K_{y2} \int y_o ds) - \theta_o + \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

$$C_{ICR}^* = K_{\theta1} (\theta_o^* - \theta_o) + K_{\theta2} \int (\theta_o^* - \theta_o) dt + \frac{C_{ref} \cos \phi_{dir}}{1 - C_{ref} y_o} \quad (4)$$

DM の初期位置偏差 0.2m, 姿勢偏差 0.2rad として図 3 に示す直線と曲線とからなる経路を走行させた。走行条件を以下に示す。

Case A) DM の姿勢を目標経路の接線方向に保ちながら走行させる場合。

Case B) DM の姿勢を地上固定座標系に対して一定に保ちながら走行させる場合。

Case A) と B) における DM と WM の走行の様子をそれぞれ、図 4, 図 5 に示す。なお、DM の走行速度はともに 0.2m/s で、制御ゲインは $K_{y1} = K_{\theta1} = 6m^{-1}$, $K_{y2} = K_{\theta2} = 1m^{-2}$ である。

図 6, 図 7 にはそれぞれ、Case A), B) における車体モジュール(DM)の横偏差, 姿勢偏差, 速度偏差を示す。なお、DM の走行速度を 0.1m/s, 0.2m/s の 2 種類で行った場合の制御結果を示している。これらより精度良い経路追従が達成できていることが分かる。

4. 4 デッドレコニング系の評価実験

実験システムにおけるデッドレコニング系の構成を図 8 に示す。前節の走行制御実験と同様、DM の初期位置偏差 0.2m, 姿勢偏差 0.2rad として図 3 に示す経路を次の 2 条件の下で走行させた。

Case A) DM の姿勢を目標経路の接線方向に保ちながら走行させる場合。

Case B) DM の姿勢を地上固定座標系に対して一定に保ちながら走行させる場合。

なお、走行回数は 2 条件とも 5 回ずつである。

WM の左右車輪は硬質ゴム製 (車輪半径 3.07cm) のため、走行毎に左右車輪径の初期公称値を 2.96 cm, 3.06 cm, 3.16 cm の 3 通り中から一様に発生させた。デッドレ

コニングの精度比較のため、位置推定アルゴリズムは次の3種類を用いた。

a)提案手法

b)各 WM が自己のオドメトリのみにより位置推定する場合、

c)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、

プラント雑音に関する分散は $R_A = R_C = 9.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}^2$, $R_{B,small} = 3.5 \times 10^{-4}$, $R_{B,large} = 1.0 \times 10^{-3} \text{rad}^2/\text{s}^2$, $R_{r,small} = 1.6 \times 10^{-11}$, $R_{r,medium} = 3.6 \times 10^{-11}$, $R_{r,large} = 4.9 \times 10^{-11} \text{m}^2$ である。WMにおけるオドメトリとジャイロによる状態推定周期、WM間通信に基づく各WMの推定値の融合周期はともに50ミリ秒である。

Case A) と B) における最終位置でのロボットの位置推定誤差をそれぞれ、図9と図10に示す。なお、図中(b)のスケールは(a), (c)のそれらと異なることに注意されたい。図より提案手法により精度良いデッドレコニングが達成できていることが分かる。

4. 5 結 言

本章では、4台の車輪モジュールからなる試作ロボットにデッドレコニング系、走行制御系を実装して実験を行い、それらの性能評価を行った。

その結果、第2,3章でのデッドレコニング系、経路追従制御系の有効性は明らかとなったが、実験系の不備により協調制御系の実証には至らなかった。また、高性能を維持するには多くのパラメータを多大な労力をかけて調整する必要があることから、遺伝的アルゴリズムによりパラメータを自動調整する方法を今後、検討する必要がある。

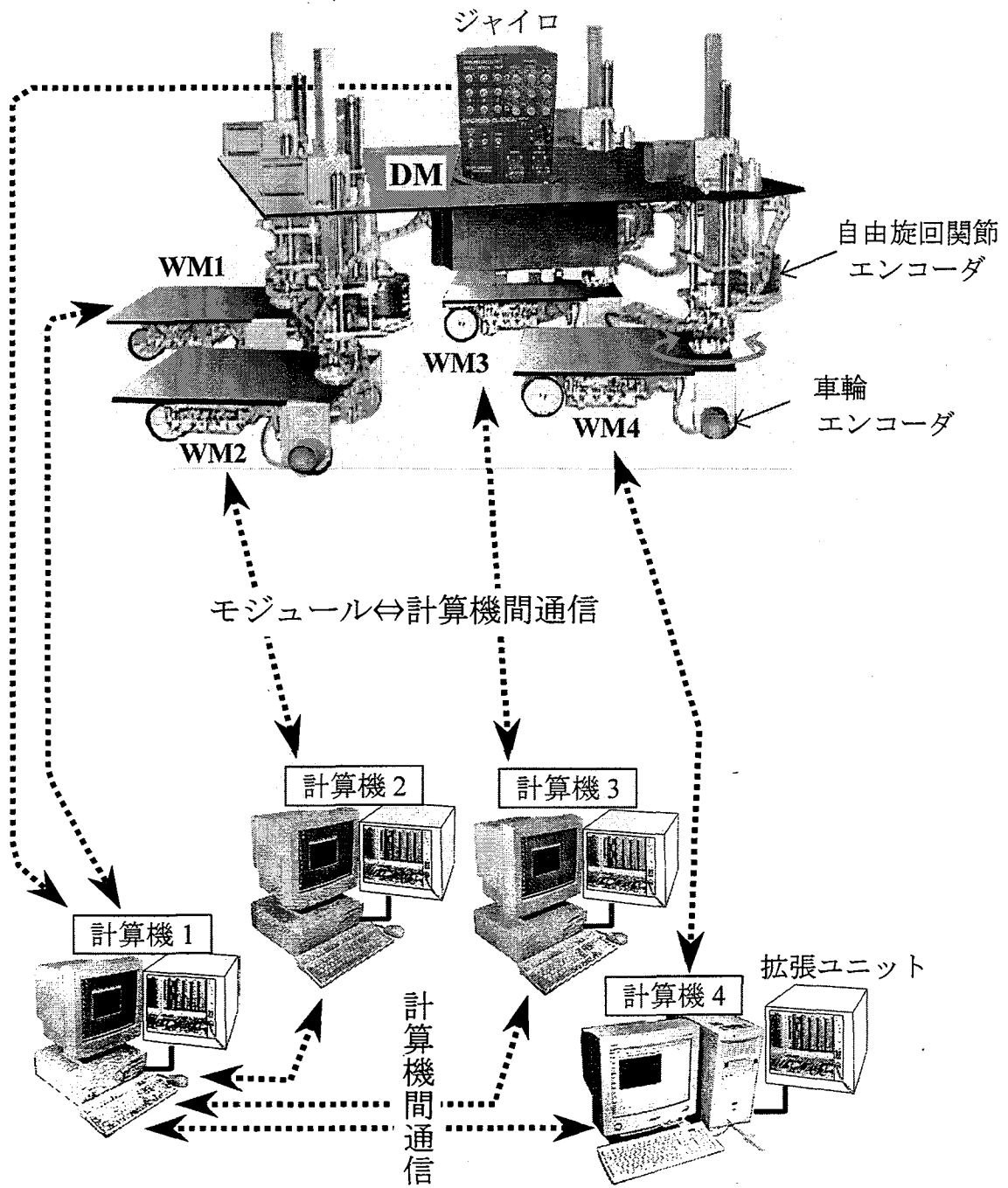


図1 実験システムの構成

表1 ハードウェアの主な仕様

車輪モジュール	<p>日本システムデザイン(株)社製 TRIPTERS mini 3輪タイプ (差動駆動輪2輪+操舵輪1輪) 車輪半径: 3.07cm 駆動輪: 日本サーボ(株)社製 DME38SA 12V 4.6W-DC モータ×2 接地型車輪エンコーダ (分解能: 100パルス/回転) によるフィードバック制御 操舵輪: 日本サーボ(株)社製 DME33S37G76A 12V 0.7W-DC モータ×1 ポテンショメータ (分解能: 0.32deg/digit) による フィードバック制御</p>
計算機 1~3	<p>富士通(株)社製 FMV Pentium133MHz OS: Windows95, 言語: Borland-C</p>
計算機 4	<p>DEC 社製 Pentium266MHz OS: Windows95, 言語: Borland-C</p>
インターフェース拡張ユニット	<p>(株)インターフェース社製 USS-1801Z</p>
メモリ共有インターフェース	<p>(株)インターフェース社製 IBX-4913, IBX-4918</p>
RS232C ポート	<p>通信速度: 115.2Kbps</p>
ジャイロ	<p>日立電線(株)社製 光ファイバージャイロ GYACROSS-CL3D(GA) バイアス値: 0.000913[rad/s] 標準偏差: 0.005[rad/s]</p>
自由旋回関節エンコーダ	<p>オムロン(株)社製 アブソリュートエンコーダ E6G-AG2C 分解能: 4096[パルス/回転]</p>
車輪エンコーダ	<p>オムロン(株)社製 E6H-CWZ6C 分解能: 3600[パルス/回転].</p>

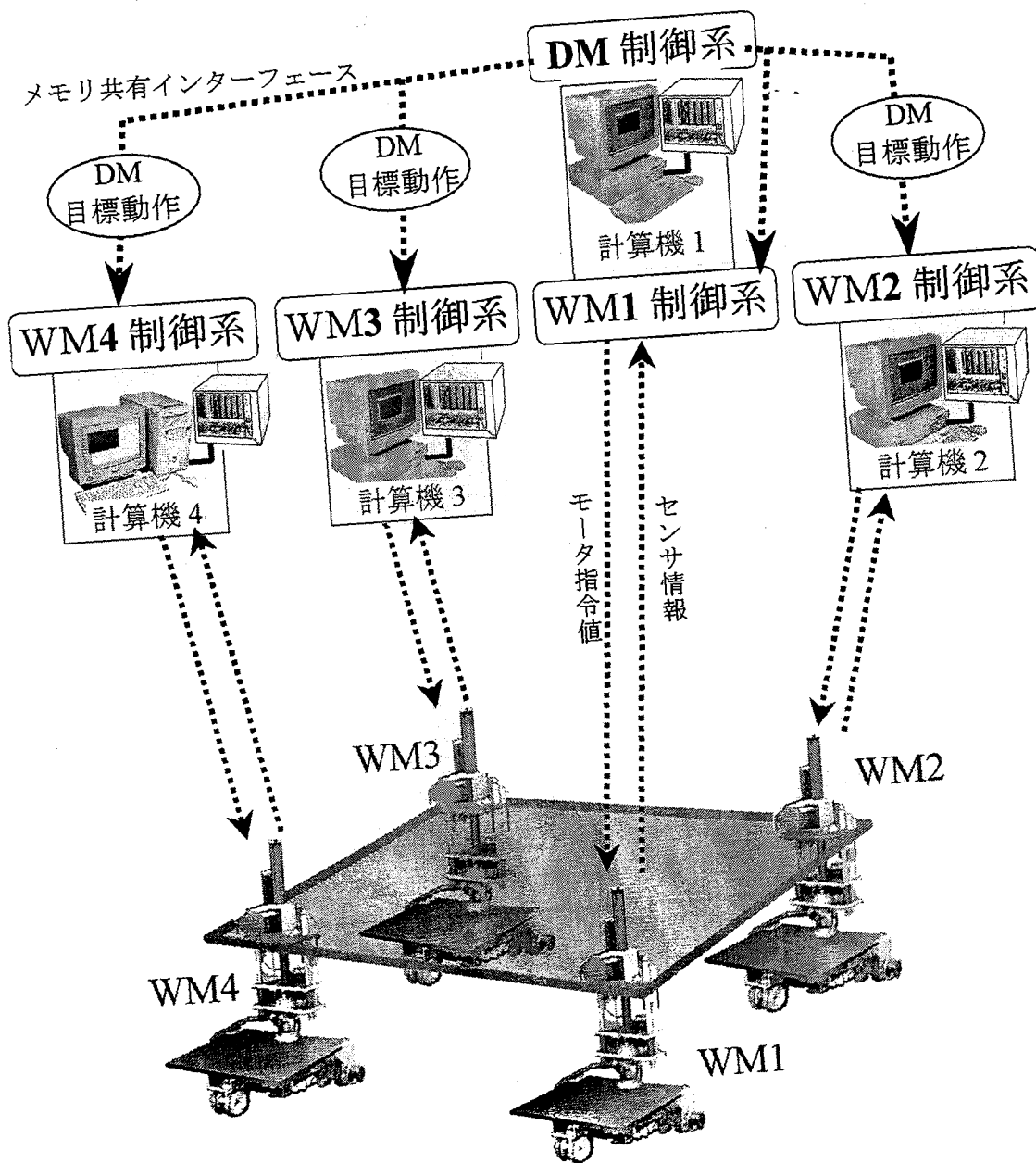


図2 実験システムにおける走行制御系の構成

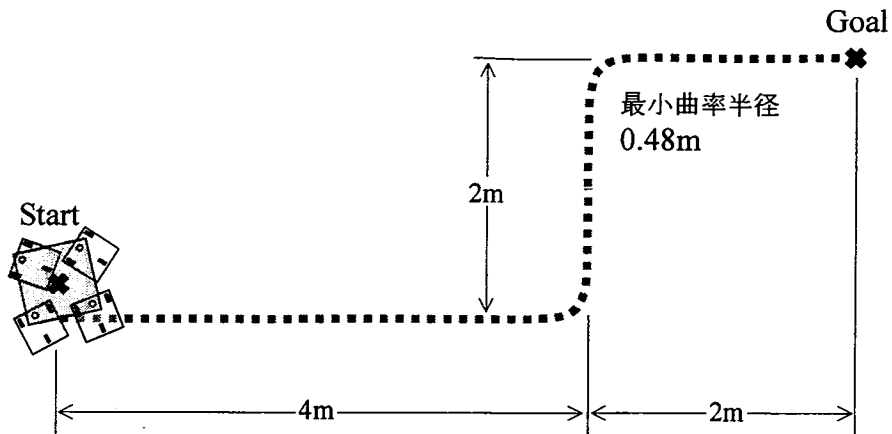


図3 目標経路

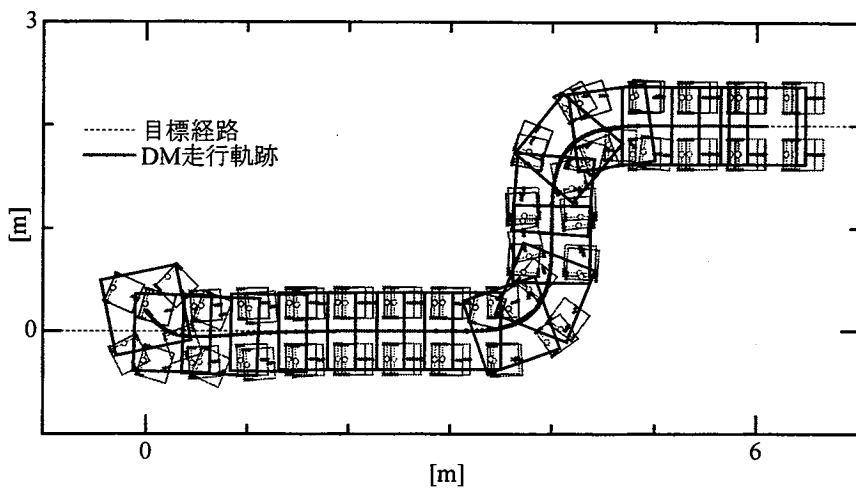


図4 走行軌跡 (Case A)

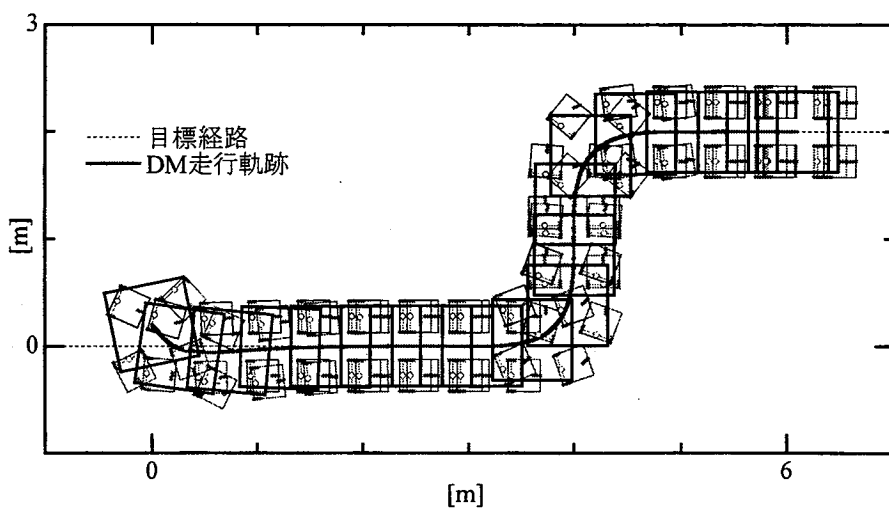
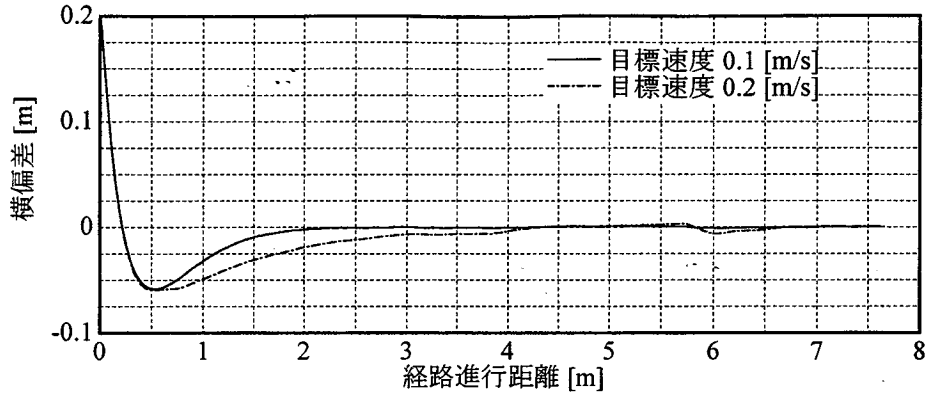
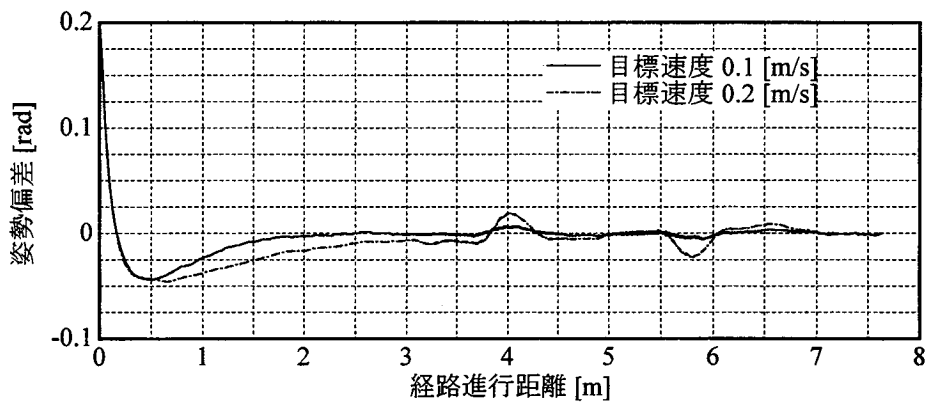


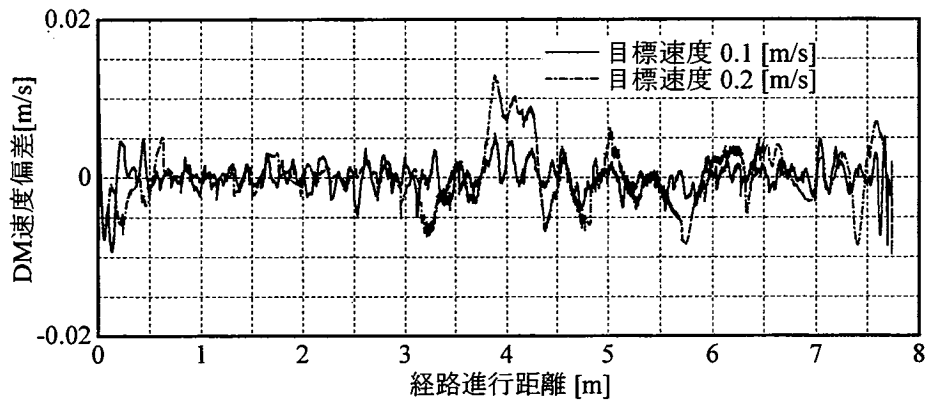
図5 走行軌跡 (Case B)



(a) DM 横偏差

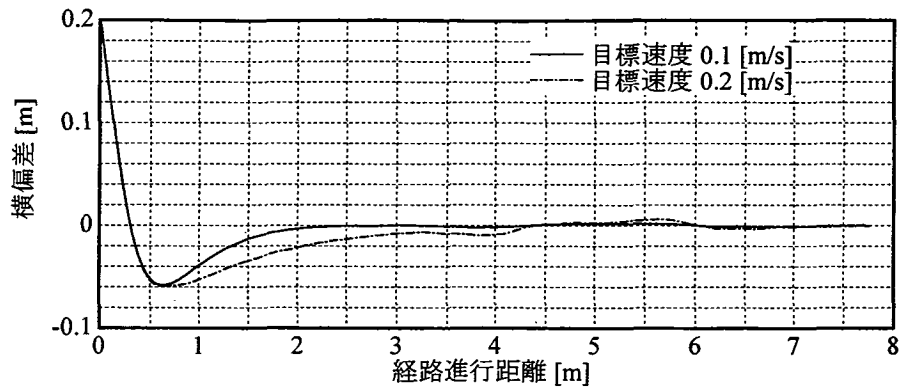


(b) DM 姿勢偏差

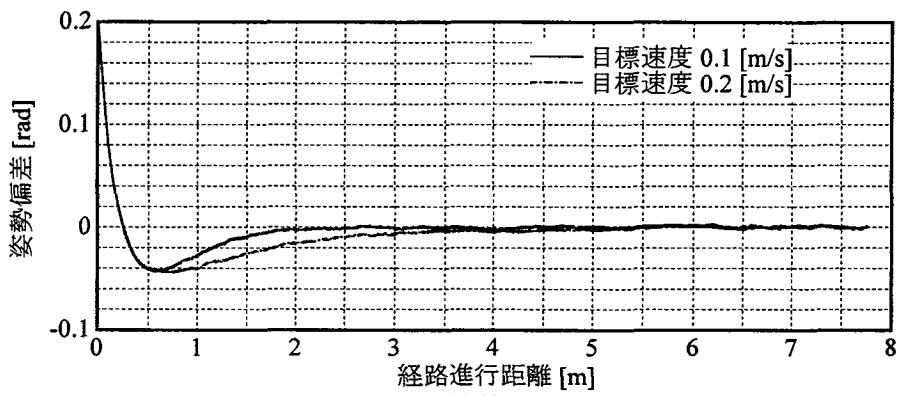


(c) DM 速度偏差

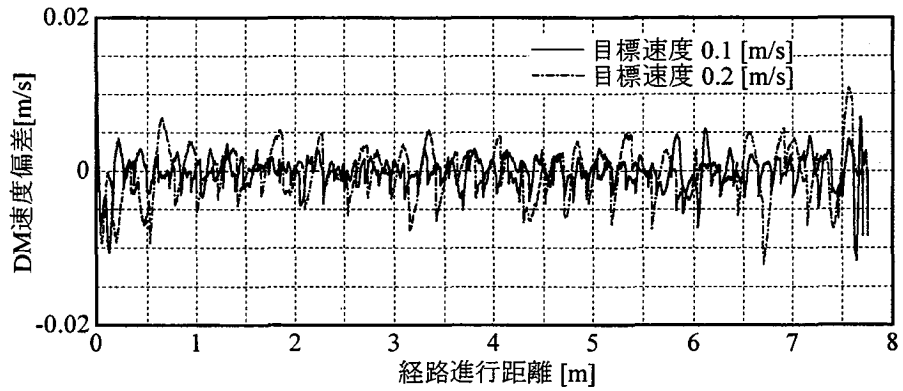
図6 DM 制御偏差 (Case A)



(a) DM 横偏差



(b) DM 姿勢偏差



(c) DM 速度偏差

図7 DM 制御偏差 (Case B)

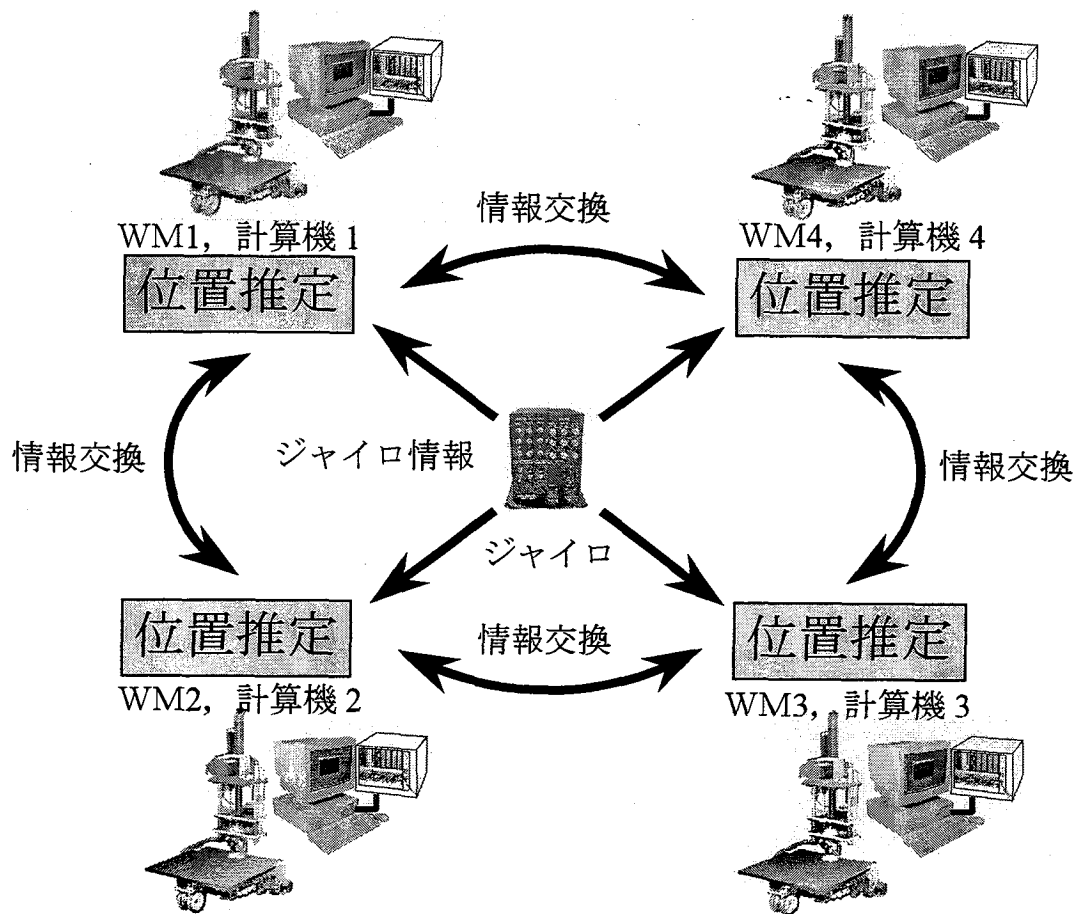
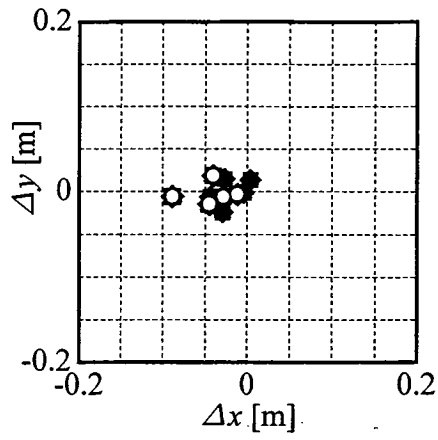
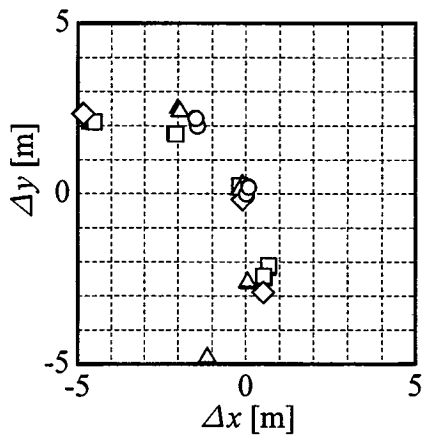


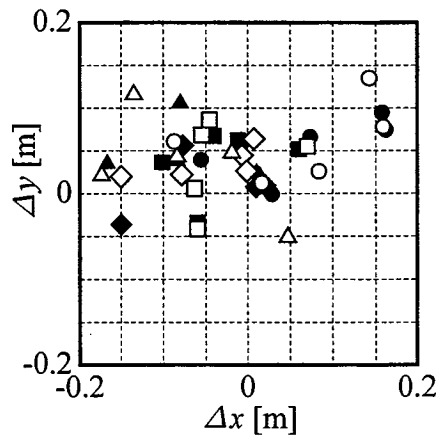
図8 実験システムにおけるデッドレコニング系の構成



(a) 提案手法

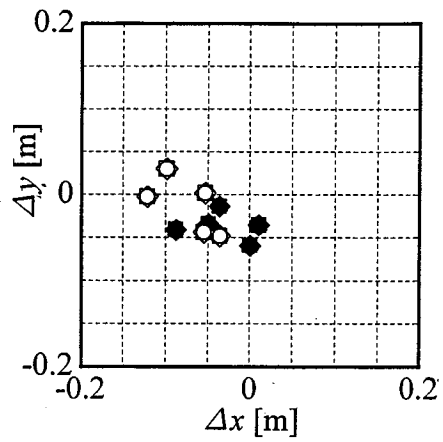


(b) オドメトリ単独

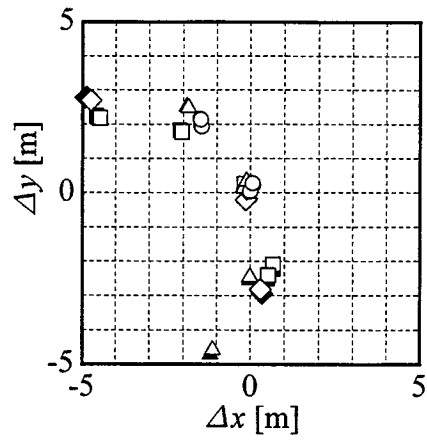


(c) オドメトリとジャイロ情報の融合

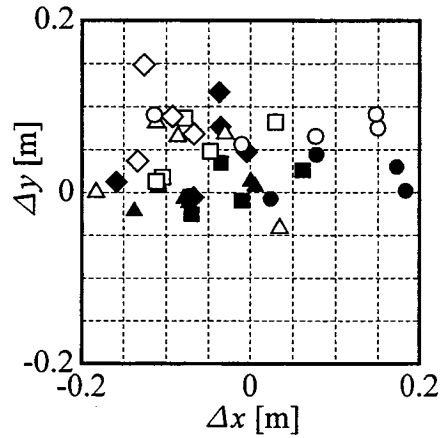
図9 最終位置での位置推定誤差 (Case A)
 (速度 0.1m/s : ○WM1, △WM2, ◇WM3, □WM4,
 速度 0.2m/s : ●WM1, ▲WM2, ◆WM3, ■WM4)



(a) 提案手法



(b) オドメトリ単独



(c) オドメトリとジャイロ情報の融合

図 10 最終位置での位置推定誤差 (Case B)

(速度 0.1m/s : ○WM1, △WM2, ◇WM3, □WM4,
速度 0.2m/s : ●WM1, ▲WM2, ◆WM3, ■WM4)

第5章 車体傾斜機構を有するモジュール型全方向移動ロボットの 走行制御系とデッドレコニング系の設計

5.1 緒言

第2章、3章では平坦路面を走行するモジュール型全方向移動ロボットを対象に、デッドレコニング系と走行制御系を設計した。本章ではこれらの手法を発展させ、車体傾斜機構を装備した非ホロノミックなモジュール型全方向移動ロボットの走行制御系とデッドレコニング系を検討する。この走行制御系とデッドレコニング系により曲路走行時においても遠心加速度に起因するロボットの転倒の危険性を低減して、荷の多段積みやロボットの高速化による物流効率の向上が期待できる。また、傾斜地や不整地での安全な重量物搬送が可能となる。

本章では、車体傾斜機構を有するモジュール型全方向移動ロボットの走行制御系、デッドレコニング系の設計の第一段階として、走行路面を平坦路面に限定し、旋回時に車体を傾斜制御しながら経路誘導する走行制御系を設計する。

5.2 移動ロボットの構成

走行制御系とデッドレコニング系の設計の対象とした実験用ロボットの外観を図1に示す。ロボットは車体モジュール (DM) と4台の車輪モジュール (WM) からなり、移動ベースは操舵輪と左右独立駆動輪を、車体傾斜機構は3自由度の回転関節と1自由度並進関節を有している (図2参照)。

車体傾斜機構の並進関節は DM と剛に接続され、並進関節を駆動することで DM の傾斜や高さを制御できる。移動ベースと車体傾斜機構の連結部は駆動輪の車軸中心上に位置することから、ロボットは非ホロノミックな運動拘束を受ける。

DM にはその傾斜角 (ロール角, ピッチ角) を計測する傾斜計とヨー角速度計測用のジャイロを搭載している。また、各 WM にはセンサとして、左右駆動輪の回転角、回転関節角、並進関節変位を計測するエンコーダやポテンショメータを装備している。

5.3 主な記号

$\Sigma_w (O_w - x_w y_w z_w)$: 走行平面を $x_w y_w$ 平面とした地上固定座標系。

$\Sigma_o (O_o - x_o y_o z_o)$: DM (車体) に固定した座標系。

$\Sigma_i (O_i - x_i y_i z_i)$: WM i ($i=1, \dots, 4$) に固定した座標系。

$\Sigma_p (O_p - x_p y_p z_p)$: Σ_o の x_o 軸を走行平面に射影した座標系。

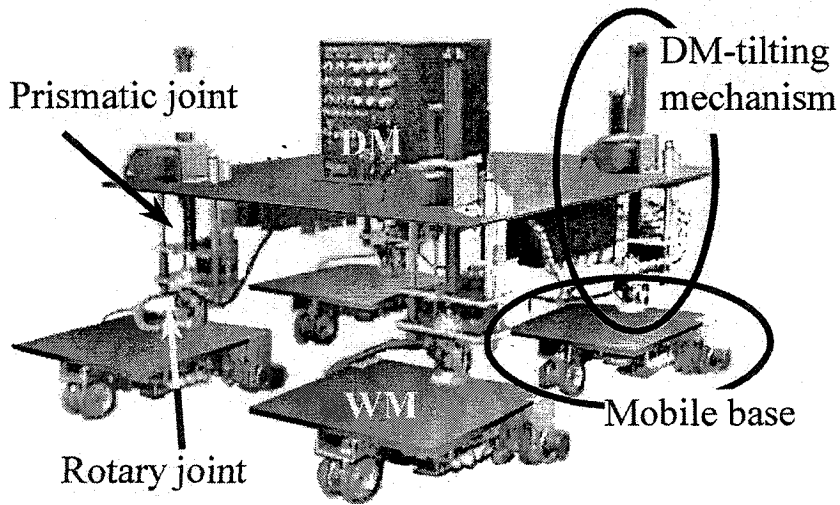


Fig.1 Overview of experimental vehicle

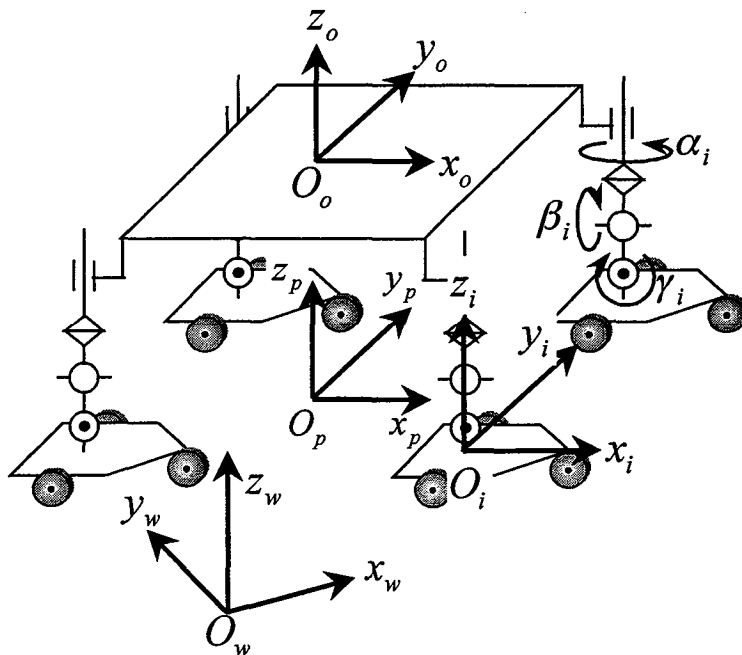


Fig.2 Vehicle mechanism and coordinate frame

$\Sigma_d(O_d - x_d y_d z_d)$: 目標経路座標系.

$r_o = (x_o, y_o, z_o)^T$: Σ_w におけるDM (点 O_o) の位置.

$r_i = (x_i, y_i, z_i)^T$: Σ_w における WMi (点 O_i) の位置.

$\varphi_o = (\phi_o, \theta_o, \psi_o)$: Σ_w におけるDMの姿勢・方位 (ロール角, ピッチ角, ヨー角).

${}^o s_i = (X_i, Y_i, -l_i)^T$: Σ_o における (点 O_i) の位置. $(X_i, Y_i)^T$ は定数. l_i は並進関節変位.

$\mathbf{a}_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)^T$: WMi の回転関節角.

${}^o\dot{\mathbf{r}}_o = ({}^o\dot{x}_o, {}^o\dot{y}_o, {}^o\dot{z}_o)^T$: Σ_o における DM の速度.

${}^i\dot{\mathbf{r}}_i = ({}^i\dot{x}_i, {}^i\dot{y}_i, {}^i\dot{z}_i)^T$: Σ_i における WMi の速度.

$\dot{\boldsymbol{\phi}}_o = (\dot{\phi}_o, \dot{\theta}_o, \dot{\psi}_o)^T$: DM の角速度.

${}^o\dot{\boldsymbol{\phi}}_o = ({}^o\dot{\phi}_o, {}^o\dot{\theta}_o, {}^o\dot{\psi}_o)^T$: Σ_o における DM の角速度.

${}^w\mathbf{A}_o$: Σ_o から Σ_w への座標変換行列.

${}^p\mathbf{A}_o$: Σ_o から Σ_p への座標変換行列.

${}^o\mathbf{A}_i$: Σ_i から Σ_o への座標変換行列.

${}^w\mathbf{A}_o, {}^p\mathbf{A}_o, {}^o\mathbf{A}_i$ の要素を以下に示す.

$${}^w\mathbf{A}_o = \begin{pmatrix} a_{o1} & a_{o2} & a_{o3} \\ a_{o4} & a_{o5} & a_{o6} \\ a_{o7} & a_{o8} & a_{o9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\theta_o C\psi_o & S\phi_o S\theta_o C\psi_o - C\phi_o S\psi_o & C\phi_o S\theta_o C\psi_o + S\phi_o S\psi_o \\ C\theta_o S\psi_o & S\phi_o S\theta_o S\psi_o + C\phi_o C\psi_o & C\phi_o S\theta_o S\psi_o - S\phi_o C\psi_o \\ -S\theta_o & S\phi_o C\theta_o & C\phi_o C\theta_o \end{pmatrix}$$

$${}^p\mathbf{A}_o = \begin{pmatrix} a'_{o1} & a'_{o2} & a'_{o3} \\ a'_{o4} & a'_{o5} & a'_{o6} \\ a'_{o7} & a'_{o8} & a'_{o9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\theta_o & S\phi_o S\theta_o & C\phi_o S\theta_o \\ 0 & C\phi_o & -S\phi_o \\ -S\theta_o & S\phi_o C\theta_o & C\phi_o C\theta_o \end{pmatrix}$$

$${}^o\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \\ a_{i4} & a_{i5} & a_{i6} \\ a_{i7} & a_{i8} & a_{i9} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S\alpha_i S\beta_i S\gamma_i + C\alpha_i C\gamma_i & -S\alpha_i C\beta_i & S\alpha_i S\beta_i C\gamma_i + C\alpha_i S\gamma_i \\ C\alpha_i S\beta_i S\gamma_i + S\alpha_i C\gamma_i & C\alpha_i C\beta_i & -C\alpha_i S\beta_i C\gamma_i + S\alpha_i S\gamma_i \\ -C\beta_i S\gamma_i & S\beta_i & C\beta_i C\gamma_i \end{pmatrix}$$

なお, C, S は \cos, \sin を表わす.

5. 4 走行制御法

5.4.1 車体モジュールの目標運動

5.4.1.1 経路追従制御

いま, Σ_o における DM の z_o 軸方向の速度 ${}^o\dot{z}_o$ は微小で無視できるとする. その時, $x_w y_w$ 平面上での DM の運動学式は以下となる (図 3 参照).

$$\begin{cases} \frac{d^d y_p}{dx} = \tan^d \psi_{dir} \\ \frac{d^d \psi_p}{ds} = C_{ICR} - \frac{C_{ref} \cos^d \psi_{dir}}{1 - C_{ref}^d y_p} \end{cases} \quad (1)$$

ただし, ${}^d y_p, {}^d \psi_p$ は Σ_d における DM の横位置と方位, s は DM の初期位置からの進行距離, x は目標経路に沿った距離である. また, ${}^d \psi_{dir}$ は Σ_d での DM の進行方位, C_{ICR} は DM の旋回曲率, C_{ref} は目標経路の曲率. 上式第 2 式の右辺第 2 項はロボッ

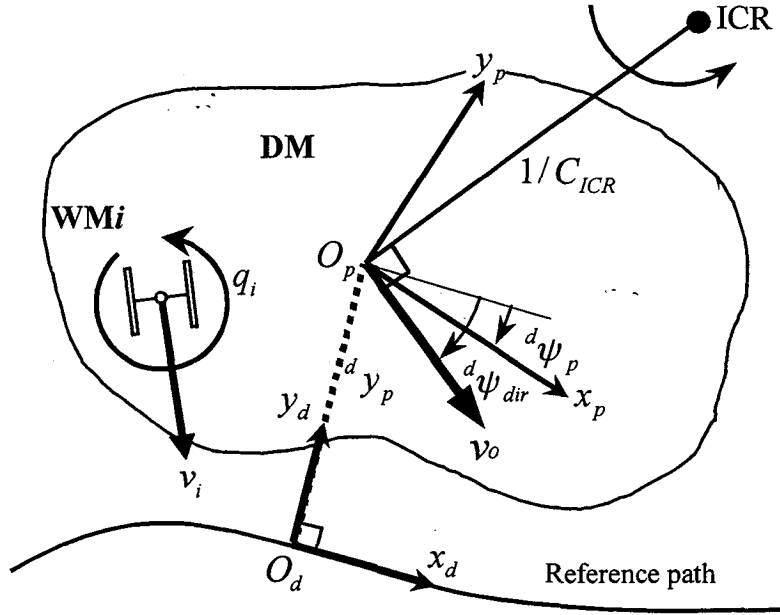


Fig.3 Notation relating to the path tracking control

トの走行に伴う目標経路の方位変化である。

DM の横位置 ${}^d y_p$ をゼロに, ${}^d \psi_p$ を目標値 ${}^d \psi_p^*$ に収束させる経路追従を実現するため, (1)式をもとに瞬時旋回中心 (ICR) の曲率 C_{ICR}^* , ロボットの進行方位 ${}^d \psi_{dir}^*$ を以下で定める。

$$C_{ICR}^* = -k_{\psi 1} \Delta^d \psi_p - k_{\psi 2} \int \Delta^d \psi_p ds + \frac{C_{ref} \cos^d \psi_{dir}}{1 - C_{ref}^d y_p} \quad (2)$$

$${}^d \psi_{dir}^* = \tan^{-1} \left(-k_{y1} {}^d y_p - k_{y2} \int {}^d y_p ds \right) \quad (3)$$

ただし, $\Delta^d \psi_p = {}^d \psi_p - {}^d \psi_p^*$. $k_{\psi j}, k_{y j} (j=1,2)$ はゲイン。

DM の並進速度 v_o^* は任意に与える。式(2),(3)よりにおける DM の目標速度 ${}^p \dot{\mathbf{r}}_p^*$, Σ_w におけるヨー角速度の目標値 $\dot{\psi}_o^*$ は,

$${}^p \dot{\mathbf{r}}_p^* = v_o^* \begin{pmatrix} \cos({}^d \psi_{dir}^* - {}^d \psi_p) \\ \sin({}^d \psi_{dir}^* - {}^d \psi_p) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\dot{\psi}_o^* = C_{ICR}^* v_o^* \quad (5)$$

となることから、経路追従を実現する Σ_o における DM の目標速度 ${}^o\dot{\mathbf{r}}_{o-path}^*$ は以下となる。

$${}^o\dot{\mathbf{r}}_{o-path}^* = {}^pA_o^{-1} {}^p\dot{\mathbf{r}}_p^* \quad (6)$$

いま、並進関節の可動範囲を $l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}$ とする。WMi の関節長を $(l_{\min} + l_{\max})/2$ 付近に保つため、

$${}^o\dot{z}_{o-height}^* = k_z \left[\frac{l_{\min} + l_{\max}}{2} - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 l_i \right] \quad (7)$$

ただし、 k_z は制御ゲイン。

を定義すると、経路追従、高さ制御を実現する Σ_o における DM の目標速度 ${}^o\dot{\mathbf{r}}_o^*$ は以下となる。

$${}^o\dot{\mathbf{r}}_o^* = {}^o\dot{\mathbf{r}}_{o-path}^* + {}^o\dot{\mathbf{r}}_{o-height}^* \quad (8)$$

ただし、 ${}^o\dot{\mathbf{r}}_{o-height}^* = (0, 0, {}^o\dot{z}_{o-height}^*)^T$ 。

5.4.1.2 車体傾斜制御

図4に示すように、積荷を含めたロボットの重心をGとする。ロボットの旋回中に遠心加速度による転倒の危険性を防止するため、G点に加わる加速度（遠心加速度 λ_c と重力加速度 g との合加速度 λ_T ）の方向と垂直となるよう DM を傾斜させる。

DMの傾斜目標値 ϕ_o^* 、 θ_o^* を容易に算出するため、以下の仮定をおく。

- ・重心Gは Σ_o の z_o 軸上にあり、重心位置 ${}^o\mathbf{r}_G = (0, 0, {}^o z_G)^T$ は既知である、
- ・ロボットは定常旋回運動を行い、車体の高さ制御、傾斜制御に伴う加速度は微小である。

そうすると、転倒を防止する目標姿勢角と Σ_o での重心Gの加速度との関係は以下となる。

$${}^o\ddot{\mathbf{r}}_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda_T \end{pmatrix} = {}^pA_o^{*-1} [\mathbf{g} + \dot{\psi}_o^* \times \{ {}^p\dot{\mathbf{r}}_p^* + (\dot{\psi}_o^* \times ({}^pA_o^* {}^o\mathbf{r}_G)) \}] \quad (9)$$

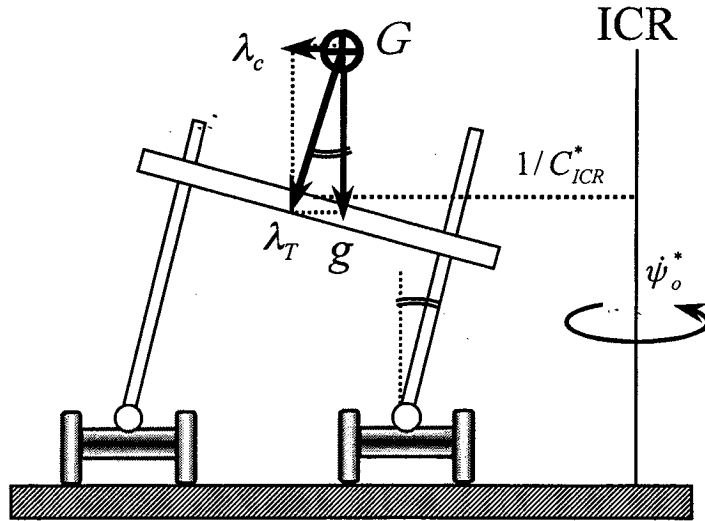


Fig.4 Notation relating to the tilting control

ただし, $\psi_o^* = (0, 0, \psi_o^*)^T$, $g = (0, 0, g)^T$ で, $\psi_o^* = C_{ICR}^* v_o^*$, g は重力加速度である.

式(9)より λ_T を消去することで, DM の目標姿勢 ϕ_o^* , θ_o^* を求める. DM の現在姿勢をその目標値と一致させる角速度を以下で定める.

$$\begin{cases} \dot{\phi}_o^* = k_\phi (\phi_o^* - \phi_o) \\ \dot{\theta}_o^* = k_\theta (\theta_o^* - \theta_o) \end{cases} \quad (10)$$

ただし, k_ϕ, k_θ は制御ゲイン.

式(5),(10)の目標角速度 $\dot{\phi}_o^*$ を Σ_o での角速度で記述すると以下となる.

$${}^o \dot{\phi}_o^* = A_\phi \dot{\phi}_o^* \quad (11)$$

ただし,

$$A_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta_o \\ 0 & \cos \phi_o & \sin \phi_o \cos \theta_o \\ 0 & -\sin \phi_o & \cos \phi_o \cos \theta_o \end{pmatrix}$$

なお, 車体傾斜制御系はフィードフォワード制御系であることに注意されたい.

5.4.2 車輪モジュールの目標運動

DM と WM*i* の位置に関する幾何学式

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_o + {}^w\mathbf{A}_o {}^o\mathbf{s}_i \quad (12)$$

を微分して整理すると以下となる.

$${}^o\mathbf{A}_i {}^i\dot{\mathbf{r}}_i = {}^o\dot{\mathbf{r}}_o + {}^o\dot{\mathbf{A}}_o {}^o\mathbf{s}_i + {}^o\dot{\mathbf{s}}_i \quad (13)$$

ただし,

$${}^o\dot{\mathbf{A}}_o = \begin{pmatrix} 0 & -{}^o\dot{\psi}_o & {}^o\dot{\theta}_o \\ {}^o\dot{\psi}_o & 0 & -{}^o\dot{\phi}_o \\ -{}^o\dot{\theta}_o & {}^o\dot{\phi}_o & 0 \end{pmatrix}$$

WMi は地面から浮かないこと (${}^i\dot{z}_i = 0$) を仮定すると, 上式より次の逆運動学式が得られる.

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{A}_{ui} [{}^o\dot{\mathbf{r}}_o + {}^o\dot{\mathbf{A}}_o {}^o\mathbf{s}_i] \quad (14)$$

ただし, $\mathbf{u}_i = ({}^i\dot{x}_i, {}^i\dot{y}_i, \dot{l}_i)^T$. \mathbf{A}_{ui} は ${}^o\mathbf{A}_i$ の要素で定まる以下の行列.

$$\mathbf{A}_{ui} = \frac{1}{a_{i9}} \begin{pmatrix} a_{i5} & -a_{i2} & 0 \\ -a_{i4} & a_{i1} & 0 \\ a_{i3} & a_{i6} & a_{i9} \end{pmatrix}$$

式(8),(11)で定まる DM の目標速度 ${}^o\dot{\mathbf{r}}_o^*$, 角速度 ${}^o\dot{\boldsymbol{\phi}}_o^*$ をともに実現する WMi の移動ベース, 並進関節の速度は式(14)をもとに

$$\mathbf{u}_i^* = \mathbf{A}_{ui} [{}^o\dot{\mathbf{r}}_o^* + {}^o\dot{\mathbf{A}}_o {}^o\mathbf{s}_i] \quad (15)$$

となり, WMi における移動ベースの目標速度 v_i^* , 操舵角偏差 e_{qi} は以下となる.

$$\begin{cases} v_i^* = (\dot{x}_i^{*2} + \dot{y}_i^{*2})^{\frac{1}{2}} \\ e_{qi}^* = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y}_i^*}{\dot{x}_i^*} \right) \end{cases} \quad (16)$$

\dot{l}_i^* , v_i^* , e_{qi}^* をもとに WM のアクチュエータを制御することで, DM の目標運動が実現できる.

5. 5 デッドレコニング

走行制御系で必要な DM の現在位置や姿勢・方位を推定する基礎となるデッドレ

コニング系を設計する。いま、DMは一定の速度・角速度で運動すると仮定すると、DMに関して以下の離散時間系状態方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r}_o(t+1) \\ \boldsymbol{\phi}_o(t+1) \\ {}^o\dot{\mathbf{r}}_o(t+1) \\ {}^o\dot{\boldsymbol{\phi}}_o(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_o(t) + {}^w\mathbf{A}_o(t) {}^o\dot{\mathbf{r}}_o(t)\tau + \frac{1}{2} {}^w\mathbf{A}_o(t) \Delta^o\ddot{\mathbf{r}}_o(t)\tau^2 \\ \boldsymbol{\phi}_o(t) + \mathbf{A}_{\dot{\boldsymbol{\phi}}}^{-1}(t) {}^o\dot{\boldsymbol{\phi}}_o(t)\tau + \frac{1}{2} \mathbf{A}_{\dot{\boldsymbol{\phi}}}^{-1}(t) \Delta^o\ddot{\boldsymbol{\phi}}_o(t)\tau^2 \\ {}^o\dot{\mathbf{r}}_o(t) + \Delta^o\ddot{\mathbf{r}}_o(t)\tau \\ {}^o\dot{\boldsymbol{\phi}}_o(t) + \Delta^o\ddot{\boldsymbol{\phi}}_o(t)\tau \end{pmatrix} \quad (17)$$

ただし、 $\Delta^o\ddot{\mathbf{r}}_o$ 、 $\Delta^o\ddot{\boldsymbol{\phi}}_o$ はそれぞれ ${}^o\dot{\mathbf{r}}_o$ 、 ${}^o\dot{\boldsymbol{\phi}}_o$ の微小変動（加速度）で、ともに平均値ゼロの正規性白色雑音と仮定する。 τ はサンプリング周期。

上式をベクトル表記すると

$$\boldsymbol{\xi}(t+1) = \mathbf{f}(\boldsymbol{\xi}(t), \Delta\mathbf{w}(t)) \quad (18)$$

ただし、 $\Delta\mathbf{w} = (\Delta^o\ddot{\mathbf{r}}_o^T, \Delta^o\ddot{\boldsymbol{\phi}}_o^T)^T$ 。

DMに搭載した傾斜計とジャイロの出力に関する観測方程式は次式となる。

$$\mathbf{z}_o(t) = \mathbf{H}_o \boldsymbol{\xi}_o(t) + \Delta\mathbf{z}_o(t) \quad (19)$$

ただし、 $\mathbf{z}_o = (\phi_o, \theta_o, {}^o\psi_o)^T$ 。 $\Delta\mathbf{z}_o$ は \mathbf{z}_o の観測雑音で平均値ゼロの正規性白色雑音と仮定する。また、

$$\mathbf{H}_o = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

WMiは横滑りせず、また、路面から浮かないこと（すなわち ${}^i\dot{\mathbf{r}}_i = (v_i, 0, 0)^T$ ）を仮定すると、式(14)の逆運動学式は次式となる。

$$\begin{pmatrix} a_{i1}v_i \\ a_{i4}v_i \\ a_{i7}v_i + \dot{l}_i \end{pmatrix} = {}^o\dot{\mathbf{r}}_o + {}^o\dot{\mathbf{A}}_o {}^o\mathbf{s}_i \quad (20)$$

上式の左辺はWMiのセンサ情報で定まることから、WMiに関して以下の観測方程式が成立する。

$$\mathbf{z}_i(t) = \mathbf{H}_i \boldsymbol{\xi}_i(t) + \Delta\mathbf{z}_i(t) \quad (21)$$

ただし, $\mathbf{z}_i = (a_{i1}v_i, a_{i4}v_i, a_{i7}v_i + l_i)^T$. $\Delta\mathbf{z}_i$ は \mathbf{z}_i の観測雑音で平均値ゼロの正規性白色雑音と仮定する. また,

$$\mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -l_i & -Y_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & l_i & 0 & X_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Y_i & -X_i & 0 \end{pmatrix}$$

式(19),(21)をまとめることで, ロボット全体に関する観測方程式が得られる.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{z}_0(t) \\ \mathbf{z}_1(t) \\ \mathbf{z}_2(t) \\ \mathbf{z}_3(t) \\ \mathbf{z}_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{H}_3 \\ \mathbf{H}_4 \end{pmatrix} \boldsymbol{\xi}(t) + \begin{pmatrix} \Delta\mathbf{z}_0(t) \\ \Delta\mathbf{z}_1(t) \\ \Delta\mathbf{z}_2(t) \\ \Delta\mathbf{z}_3(t) \\ \Delta\mathbf{z}_4(t) \end{pmatrix} \quad (22)$$

これをベクトル表記すると,

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\boldsymbol{\xi}(t) + \Delta\mathbf{z}(t) \quad (23)$$

式(18),(23)をもとにカルマンフィルタを構成して $\boldsymbol{\xi}$ を推定する. すなわち, 式(18)に基づく状態推定値は,

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}(t+1) = \mathbf{f}(\hat{\boldsymbol{\xi}}(t)) \quad (24)$$

となり, その不確実性は誤差の伝播則から次式の誤差共分散行列 $\mathbf{P} = E\{\Delta\hat{\boldsymbol{\xi}}\Delta\hat{\boldsymbol{\xi}}^T\}$ で推定できる.

$$\mathbf{P}(t+1) = \mathbf{F}(t)\mathbf{P}(t)\mathbf{F}(t)^T + \mathbf{G}(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{G}(t)^T \quad (25)$$

ただし, \mathbf{Q} は $\Delta\mathbf{w}$ の共分散行列. $\mathbf{F} = \partial\mathbf{f} / \partial\boldsymbol{\xi}$, $\mathbf{G} = \partial\mathbf{f} / \partial\Delta\mathbf{w}$.

観測値 \mathbf{z} より状態推定値とその誤差共分散は次式で修正できる.

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}^+(t) = \hat{\boldsymbol{\xi}}(t) + \mathbf{K}(t)(\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}\hat{\boldsymbol{\xi}}(t)) \quad (26)$$

$$\mathbf{P}^+(t) = \mathbf{P}(t) - \mathbf{K}(t)\mathbf{H}\mathbf{P}(t) \quad (27)$$

ただし, $\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(t)]^{-1}$, $\mathbf{R} = E\{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}^T\}$.

なお, DM の運動を一定の速度, ヨー角速度, 一定の姿勢角 (ロール, ピッチ角) と仮定できる場合は, 状態方程式を式(17)に代わって次式とすることで, 同様な手順

で位置や姿勢・方位が推定できる.

$$\begin{pmatrix} r_o(t+1) \\ \phi'_o(t+1) \\ \psi_o(t+1) \\ {}^o\dot{r}_o(t+1) \\ {}^o\dot{\psi}_o(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_o(t) + {}^wA_o(t) {}^o\dot{r}_o(t)\tau + \frac{1}{2} {}^wA_o(t) \Delta {}^o\ddot{r}_o(t)\tau^2 \\ \phi'_o(t) + \Delta \phi'_o(t)\tau \\ \psi_o(t) + b_1(t) \Delta \dot{\theta}_o(t)\tau + b_2(t) ({}^o\dot{\psi}_o(t)\tau + \frac{1}{2} \Delta {}^o\ddot{\psi}_o(t)\tau^2) \\ {}^o\dot{r}_o(t) + \Delta {}^o\dot{r}_o(t)\tau \\ {}^o\dot{\psi}_o(t) + \Delta {}^o\dot{\psi}_o(t)\tau \end{pmatrix} \quad (28)$$

ただし, $\phi'_o = (\phi_o, \theta_o)^T$. $\Delta \phi'_o = (\Delta \dot{\phi}_o, \Delta \dot{\theta}_o)^T$, $\Delta {}^o\dot{\psi}_o$ はそれぞれ, ϕ'_o , ${}^o\dot{\psi}_o$ の微小変動. また,

$$b_1 = \frac{\sin \phi_o}{\cos \theta_o \cos \phi_o}, \quad b_2 = \frac{1}{\cos \theta_o \cos \phi_o}.$$

5. 6 走行制御系の基礎実験

図5に示す経路に沿ってロボットを走行させた. 経路制御に関する DM の方位目標値 ψ_o^* は経路の接線方向とした. ロボットは低速 (0.2m/s) で走行することから, DM の姿勢目標値 (${}^w\phi_o^*$, ${}^w\theta_o^*$) は非常に小さい. そこで, 実験では式(5)中の $C_{ICR}^* v_o^{*2} / g$ を7倍して姿勢目標値を算出した.

DM の経路追従制御誤差, 姿勢制御誤差を図6(a), (b)に示す. これより提案手法で車体傾斜制御, 経路追従制御がともに実現できているのが分かる.

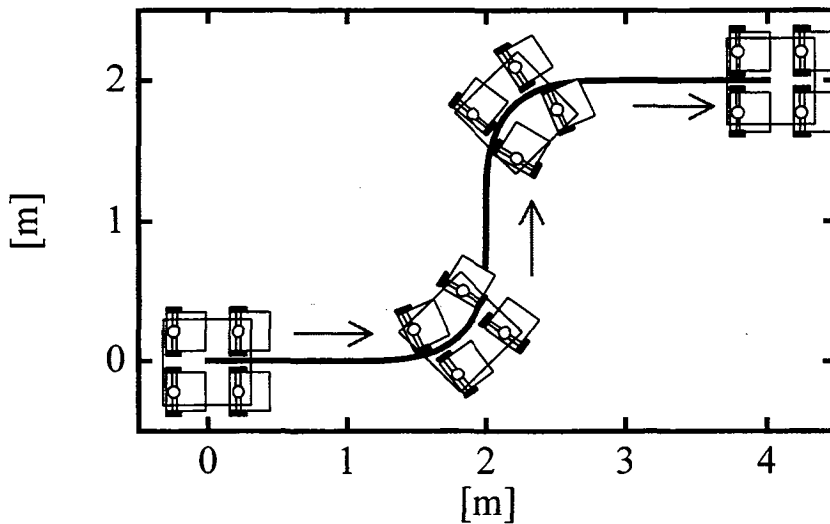
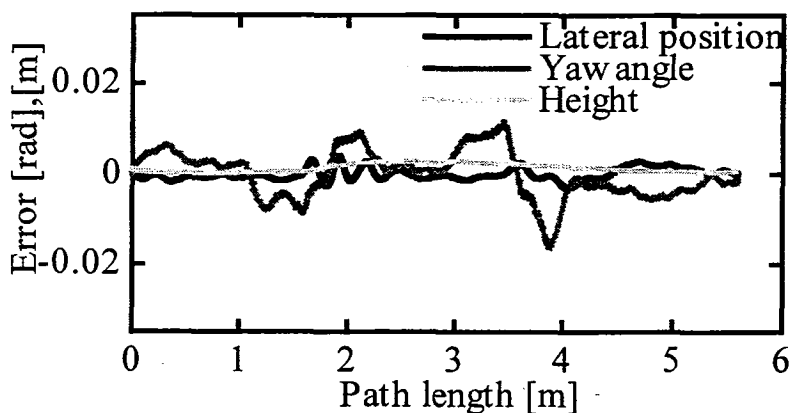
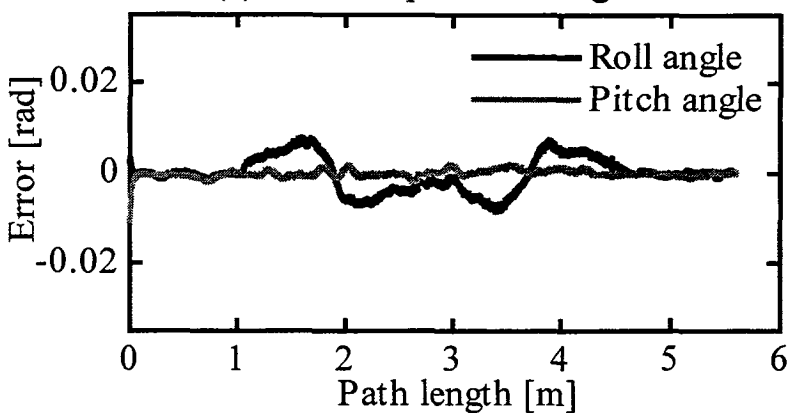


Fig.5 Reference path of DM and vehicle motion



(a) Error in path tracking control



(b) Error in DM attitude control

Fig.6 Experimental result

5.7 結 言

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 車体傾斜機構を有するモジュール型全方向移動ロボットの走行制御系設計の第一段階として、平坦路面上での旋回時の車体安定化を図るため、遠心加速度の大きさに応じて車体傾斜を制御しながらロボットを経路誘導する走行制御系を設計し、その有効性を基礎実験により示した。
- (2) 走行制御系に必要な車体の位置や姿勢・方位を推定するデッドレコニング系を設計した。

今後の課題としては、傾斜地走行のための走行制御系の設計、デッドレコニングアルゴリズムの分散化などが挙げられる。

第6章 モジュール型屋外全方向移動ロボットの デッドレコニング系の設計

DESIGN OF DEAD RECKONING FOR A MODULAR OUTDOOR OMNIDIRECTIONAL AGV

6.1 INTRODUCTION

There has been increasing interest in the development of outdoor AGV (Automated Guided Vehicle) systems for a variety of applications in areas such as cargo handling (Durrant-Whyte, 1996) and mining (Scheding, et al., 1999).

Dead reckoning that accurately identifies vehicle absolute positions using internal sensors is a fundamental requirement for achieving the vehicle navigation in outdoor environments as well as in indoor environments. Maeyama et al. (1997) presented a dead reckoning by fusing odometry and gyro for a small mobile robot on ordinary pavements. Dead reckoning using odometry and gyro for automobiles was discussed in ITS (Intelligent Transport System) community. Multi-internal sensors (i.e., odometry, gyro, inclinometer, and accelerometer) were applied to find vehicle positions in undulatory and rough terrain environments (Aono, et al., 1998, Fuke and Krotkov, 1996, Kelly, 1994).

In this chapter, we address a dead reckoning for a large outdoor AGV by using odometry and optical fiber gyro. The vehicle is a prototype to develop advanced AGV systems for applications such as cargo handling in port environment, coil handling in iron industry, and material handling in civil and construction industry.

Our important contribution in this paper is the application of a dead reckoning to a real outdoor AGV. This paper is organized as follows: the next section shows the overview of our AGV. The third and fourth sections present the AGV kinematics and the dead reckoning algorithm, respectively. In the fifth section, experiments are conducted to evaluate the accuracy of the dead reckoning, followed by conclusions.

6.2 OVERVIEW OF AGV

Figure 1 shows the overview of our outdoor AGV. The vehicle size is 10m length, 2.7m width and 1.3m height, and the maximum payload is 10ton. The vehicle drives on pneumatic wheels over ordinary pavements at speeds up to 15km/h. The vehicle has two kinds of wheel-units illustrated in Fig.2. Two drive-wheel units and two caster-wheel units are assembled

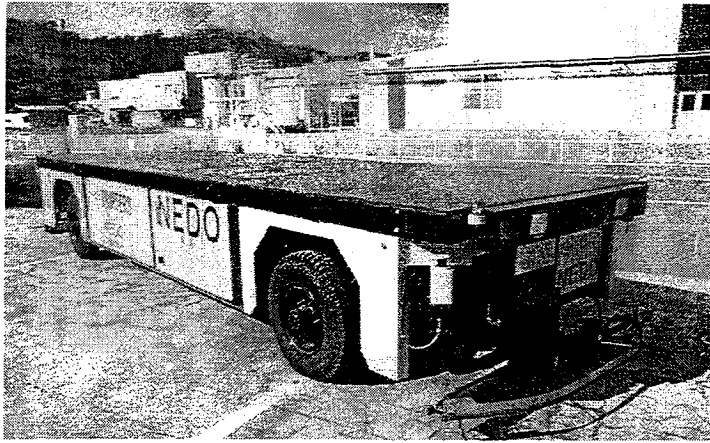


Fig.1. Overview of AGV

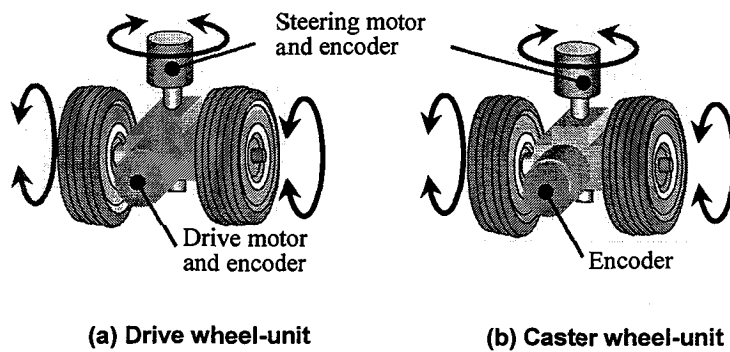


Fig.2. Configuration of wheel unit

diagonally into the vehicle. All wheel-units can be steered, and thus the vehicle can achieve omnidirectional motions under the non-holonomic constraints.

Each wheel-unit has wheel and steering encoders to measure the wheel speed and steering angle. An optical fiber gyro sensing turn velocity is attached to the vehicle chassis.

6.3 VEHICLE KINEMATICS

Figure 3 shows notations relating to a kinematics of the vehicle. The wheel velocities and steering angles are denoted by v_{F1} , v_{F2} , v_{R1} , v_{R2} , and ϕ_{F1} , ϕ_{F2} , ϕ_{R1} , ϕ_{R2} for the front left, front right, rear left and rear right wheel-units, respectively. The wheel velocity v_{ij} , where $i=F,R$, and $j=1,2$, is calculated by

$$v_{ij}(t) = r_{ij}(t)\dot{q}_{ij}(t) \quad (1)$$

where t is a time step. r_{ij} and \dot{q}_{ij} are the wheel radius and rotational velocity, respectively, of the wheel-unit ij .

The four wheel-units are controlled based on the Ackerman geometry, and thus two imaginary wheels placed along the centerline of the vehicle can be considered in place of the real four wheel-units assembled into the vehicle as shown in Fig.3. The steering angle and velocity of the imaginary wheel i are kinematically decided:

$$\phi_i(t) = \arctan \frac{2 \tan \phi_{i1}(t) \tan \phi_{i2}(t)}{\tan \phi_{i1}(t) + \tan \phi_{i2}(t)} \quad (2)$$

$$v_i(t) = \frac{1}{2 \cos \phi_i(t)} (v_{i1}(t) \cos \phi_{i1}(t) + v_{i2}(t) \cos \phi_{i2}(t)) \quad (3)$$

$$= r_i(t) \dot{q}_i(t)$$

where r_i and \dot{q}_i are the wheel radius and rotational velocity, respectively, of the imaginary wheel i . The rotational velocity is defined by

$$\dot{q}_i(t) = \frac{1}{2 \cos \phi_i(t)} (\dot{q}_{i1}(t) \cos \phi_{i1}(t) + \dot{q}_{i2}(t) \cos \phi_{i2}(t)) \quad (4)$$

The moving direction ϕ , translational velocity v , and turn velocity $\dot{\theta}$ of the vehicle are

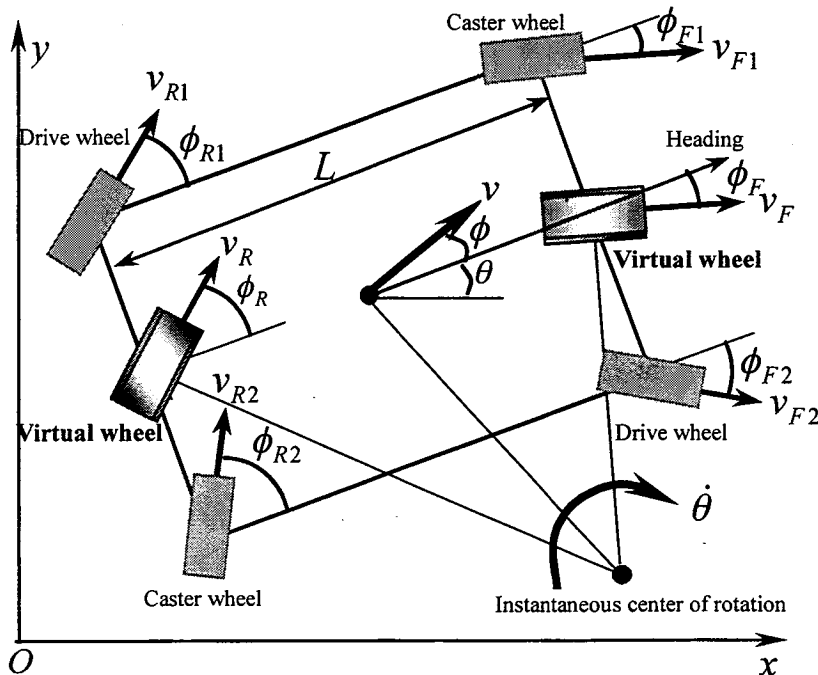


Fig.3. Notations relating to the vehicle kinematics

given by

$$\left. \begin{aligned} \phi(t) &= \arctan \frac{\tan \phi_F(t) + \tan \phi_R(t)}{2} \\ v(t) &= \frac{1}{2 \cos \phi(t)} (v_F(t) \cos \phi_F(t) + v_R(t) \cos \phi_R(t)) \\ \dot{\theta}(t) &= \frac{1}{L} (-v_F(t) \sin \phi_F(t) + v_R(t) \sin \phi_R(t)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

The rate kinematics of the vehicle is

$$\left. \begin{aligned} x(t+1) &= x(t) + v(t)\tau \cos \left\{ \theta(t) + \phi(t) + \frac{\dot{\theta}(t)}{2} \tau \right\} \\ y(t+1) &= y(t) + v(t)\tau \sin \left\{ \theta(t) + \phi(t) + \frac{\dot{\theta}(t)}{2} \tau \right\} \\ \theta(t+1) &= \theta(t) + \dot{\theta}(t)\tau \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

where x and y are the vehicle position, and θ is the vehicle orientation. τ is the sampling period.

Equation (6) is written in the following vector form:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{r}(t)) \quad (7)$$

where $\mathbf{x} = (x, y, \theta)^T$, $\mathbf{r} = (r_F, r_R)^T$, and $\mathbf{u} = (\dot{q}_F, \dot{q}_R, \phi_F, \phi_R)^T$. \mathbf{f} is the non-linear multivariable function of \mathbf{x} , \mathbf{u} , and \mathbf{r} .

The input vector \mathbf{u} calculated based on Eqs.(2) and (4) from encoder outputs is denoted as $\hat{\mathbf{u}}$, and the associated error vector as $\Delta \mathbf{u}$, that is,

$$\mathbf{u}(t) = \hat{\mathbf{u}}(t) + \Delta \mathbf{u}(t) \quad (8)$$

Use of pneumatic wheels causes changes of wheel radius due to changes in vehicle loads, roughness of road surfaces and so on. The change of the imaginary wheel radius is modeled as:

$$\mathbf{r}(t+1) = \mathbf{r}(t) + \Delta \mathbf{r}(t) \quad (9)$$

where $\Delta \mathbf{r}$ is the disturbance rate error.

Finally, the vehicle kinematics can be represented by

$$\xi_{(t+1)} = \begin{pmatrix} f(\xi_{(t)}, \hat{u}_{(t)} + \Delta u_{(t)}) \\ \hat{\theta}_{(t)} \\ r_{(t)} + \Delta r_{(t)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

And it is written in the following vector form:

$$\xi_{(t+1)} = g(\xi_{(t)}, \hat{u}_{(t)}, \Delta w_{(t)}) \quad (11)$$

where $\xi = (x^T, \hat{\theta}, r^T)^T$. $\Delta w = (\Delta u^T, \Delta r^T)^T$ is the disturbance vector. g is the non-linear multivariable function of ξ , \hat{u} and Δw .

6.4 DEAD RECKONING ALGORITHM

The dead reckoning is performed in the following way: The vehicle estimates its own position from outputs of wheel and steering encoders. The odometry suffers from many disturbances in real world. For example, the error in wheel controls brings the wheel slipping and skidding. A roughness of road surfaces also gives large effects on the odometry. To improve the positioning accuracy of the odometry under such disturbances, the vehicle senses the turn velocity of the vehicle with a gyro. The vehicle also estimates the radius of the imaginary wheels based on the gyro information. The dead-reckoning algorithm is formulated based on the extended Kalman filter.

The odometry gives the state estimate $\hat{\xi}$ of the vehicle as follows:

$$\hat{\xi}_{(t+1)} = g(\hat{\xi}_{(t)}, \hat{u}_{(t)}) \quad (12)$$

Disturbances cause the inaccuracy in the odometry. The inaccuracy is represented by the error variance matrix $P = E\{\Delta \hat{\xi} \Delta \hat{\xi}^T\}$:

$$P_{(t+1)} = F_{(t)} P_{(t)} F_{(t)}^T + G_{(t)} Q_{(t)} G_{(t)}^T \quad (13)$$

where Q is the error variance of the disturbance vector Δw . $F = \partial g / \partial \xi$, and $G = (\partial g / \partial u, \partial g / \partial r)$.

The measurement of the gyro is modeled as

$$\omega_{gyro}(t) = H_{gyro} \xi(t) + \Delta \omega_{gyro}(t) \quad (14)$$

where ω_{gyro} is the gyro output, and $\Delta\omega_{gyro}$ is the measurement error. $H_{gyro} = (0,1,0)^T$.

From Eqs.(12), (13) and (14), the extended Kalman filter improves the state estimate and its error covariance as follows:

$$\hat{\xi}^+(t) = \hat{\xi}(t) + K_{gyro}(t)[\omega_{gyro}(t) - \hat{\theta}(t)] \quad (15)$$

$$P^+(t) = P(t) - K_{gyro}(t)H_{gyro}P(t) \quad (16)$$

where $K_{gyro}(t) = P(t)H_{gyro}^T[H_{gyro}P(t)H_{gyro}^T + R_{gyro}(t)]^{-1}$, and $R_{gyro} = E\{\Delta\omega_{gyro}^2\}$.

If the vehicle turns slowly, the wheel slipping and skidding are considered to be small. By contrast, if the vehicle turns fast, the odometry is considered to suffer from disturbances. We therefore set the level of the variance Q_u relating to the disturbance vector Δu according to the gyro information:

$$Q_u(t) = \text{diag}(a_q, a_q, a_\phi, a_\phi) |\omega_{gyro}(t)| + \bar{Q}_u \quad (17)$$

where a_q, a_ϕ and \bar{Q}_u are constants.

6.5 EXPERIMENTAL RESULTS

A magnetic guidance system using magnetic nails guided the AGV on an asphalt pavement along a path shown in Fig.4. The vehicle was steered with four wheels at the corner A and D, with rear wheels at the corner B, and with the front wheels at the corner C. In the area E, we laid four differences in level: 1.0cm, 1.8cm, 2.2cm, and 3.5cm height. The period in the state estimate of the vehicle was 50ms. The vehicle ran under the six conditions shown in Table 1.

Figure 5(a) displays the vehicle trajectory estimated by the dead reckoning, and Fig.6(a) plots the error in the position estimate of the vehicle at the goal after traveling the path. The traveled distance of the vehicle was 154m. For comparison purpose, the vehicle estimated its own position only by the odometry, and the results are shown in Fig.5(b) and Fig.6(b). As clearly in the figures, our dead reckoning provided better positioning accuracy of the vehicle than the odometry.

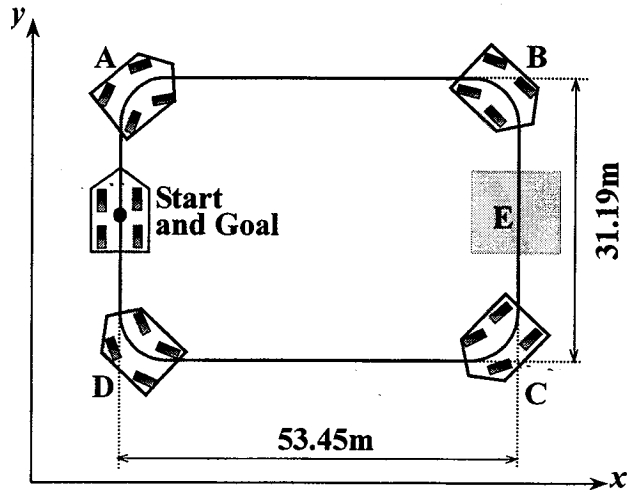
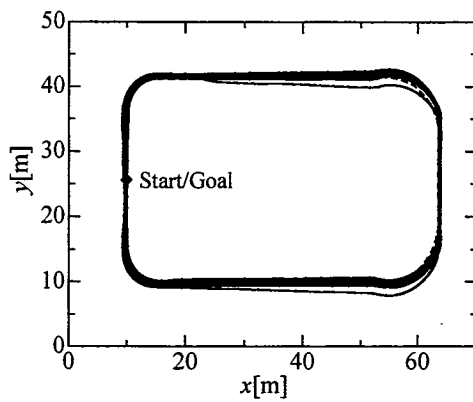


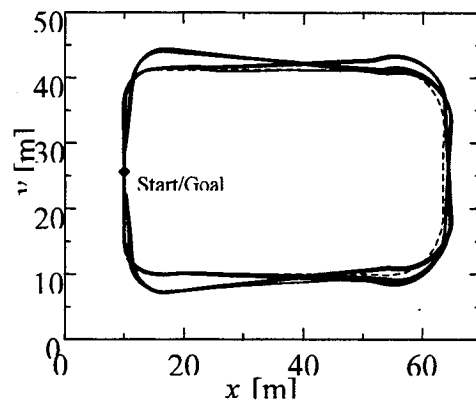
Fig.4. Traveled path of the vehicle

Table 1. Experimental condition of the vehicle

Run number	Vehicle speed	Moving direction
1	1.0m/s	Clockwise
2	1.0m/s	Clockwise
3	1.0m/s	Counterclockwise
4	1.0m/s	Counterclockwise
5	2.0m/s	Clockwise
6	2.0m/s	Counterclockwise



(a) Dead reckoning by fusing odometry and gyro



(b) Odometry

Fig.5. Estimated trajectory of the vehicle. Broken line shows the true trajectory. Thick solid lines show the results in the 1st run through the 4th run. Thin solid lines show the results in the 5th and 6th runs.

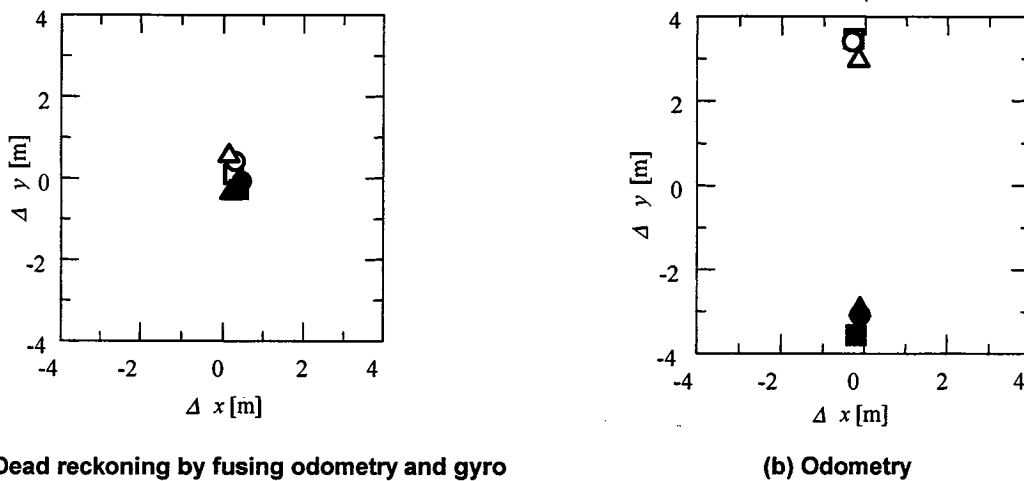


Fig.6. Error in position estimates of the vehicle at goal

6.6 CONCLUSIONS

This chapter described a dead reckoning using odometry and optical fiber gyro. Our important contribution is the application of the dead reckoning to a real outdoor AGV. To identify the vehicle position more accurately, several rules, which properly switch the level of process noise according to run-conditions of the AGV, should be incorporated into the dead reckoning algorithm. Estimation in gyro-bias is also an important issue to improve the dead reckoning accuracy. The improved dead reckoning will provide a long-range navigation of the AGV in outdoor environments with much fewer external references such as magnetic nails.

REFERENCES

- Aono, T., et al., 1998, "Positioning System of Vehicle on Undulating Area," *J. of the Robotics Society of Japan*, Vol.16, No.5, pp.728-733 (in Japanese).
- Durrant-Whyte, H.F., 1996, "An Autonomous Guided Vehicle for Cargo Handling Applications," *Int. J. of Robotics Research*, Vol.15, No.5, pp.407-440.
- Fuke, Y., and Krotkov, E., 1996, "Dead Reckoning for a Lunar Rover on Uneven Terrain," *Proc. of IEEE Int. conf. on Robotics and Automation*, pp.411-416.
- Kelly, A., 1994, "A 3D State Space Formulation of a Navigation Kalman Filter for Autonomous Vehicles," *CMU Robotics Institute Technical Report*, CMU-RI-TR-94-19.
- Maeyama, S., et al., 1997, "Robust Dead Reckoning System by Fusion of Odometry and Gyro for Mobile Robot Outdoor Navigation," *J. of the Robotics Society of Japan*, Vol.15,

No.8, pp.1180-1187 (in Japanese).

Scheding, S., et al., 1999, "An Experiment in Autonomous Navigation of an Underground Mining Vehicle," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.15, No.5, pp.407-440.

第7章 結 論

非ホロミックモジュール型全方向移動ロボットの協調制御に関する研究によって得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 複数台の車輪モジュールが有するセンサ情報を分散的に融合することで、ロボットの位置とともに、モジュール相互の動作干渉の要因となる車輪径を精度よく推定するデッドレコニング系を拡張カルマンフィルタを基礎に構築した。
- (2) 車輪モジュール相互の動作干渉を低減するため、デッドレコニング系から出力される車輪モジュールの車輪径情報、オブザーバにより推定される車輪モジュールへの外乱情報をもとに、車体の挙動を定める主動車輪モジュールと車体の運動に従い受動的なキャストの振舞いを果たす従動車輪モジュールとからなる協調制御系を設計した。
- (3) アッカーマン幾何学と非線形制御法を基礎として、目標経路に対して大きな横偏差や姿勢偏差がある場合でも車体を目標経路に安定に追従させる経路追従制御系を設計した。
- (4) 経路制御系と協調制御系とからなる走行制御系とデッドレコニング系とにより、車体や搬送物に関する質量等の慣性パラメータが不正確な場合でも、車輪の滑りを軽減して安定した経路誘導が可能であることを数値シミュレーションにより確認した。
- (5) 4台の車輪モジュールからなる全方向移動ロボットを試作し、デッドレコニング系と走行制御系とを実装して実験によりそれらの性能評価を行った。
- (6) 傾斜地や曲路において車体の傾斜を制御してその安定化を図りながらロボットを走行させることを目的として、車体傾斜機構を装備したモジュール型全方向移動ロボットに対するデッドレコニング系と走行制御系への拡張を行った。
- (7) 実機への展開の第1段階として、4台の車輪モジュールを有するモジュール型屋外大型AGVに対するデッドレコニング系を設計し、実機走行データに基づくシミュレーションによりその性能評価を行った。