全方向移動ロボットのための差動駆動操舵機構の開発

北川 秀夫^{*1} 大野 貴^{*2} 三好 孝典^{*2} 寺嶋 一彦^{*2}

Development of Differential-Drive Steering System for Omnidirectional Mobile Robot

Hideo Kitagawa^{*1}, Takashi Ohno^{*2}, Takanori Miyoshi^{*2} and Kazuhiko Terashima^{*2}

Holonomic omnidirectional mobile robot is useful with its high mobility in narrow or crowded place, and omnidirectional robot equipped with normal tires is desired for difference excess, vibration suppression and riding comfort. Caster-drive mechanism using normal tire has been developed to realize a holonomic omnidirectional robot, however, there remains some problems. This paper presents effective systems to control the caster-drive wheels of omnidirectional mobile robot. Two kinds of Differential-Drive Steering System (DDSS) are proposed to improve the operation ratio of motors. One is using bevel pair gear and the other is using planetary gear to generate driving and steering torque effectively from two motors. Simulation results show the proposed system is effective for holonomic omnidirectional mobile robots.

Key Words: Omnidirectional Mobile Robot, Holonomic, Caster-Drive, Planetary Gear

1. 緒 言

全方向移動機構は、切り返しや大回りをすることなく任意の方向への並進、回転動作が可能であるため、工場内で使用されている自動搬送車や狭所での高い機動性を持つ車いす等への応用が可能であり、その有用性が注目されている。

二次元平面を任意の方向へ瞬時に移動可能な車両はホロノミック全方向移動車両と呼ばれ、これまでにいくつかの機構が提案され、その適用例も報告されている [1]~[6]。しかし、これらの機構はメカナムホイール、ボールホイール、オムニディスク、オムニホイールといった特殊車輪を用いて全方向移動機能を実現しているため、通常のゴムタイヤを用いた車両に比べて、段差乗り越え等を含む走破性や走行安定性（振動、車輪のスリップ等）に大きな問題がある。

通常のタイヤを装着できる機構では、移動前に進行方向にタイヤの向きを変える動作が必要となるノンホロノミック全方向移動機構 [7] [8] も提案されているが、ホロノミック全方向移動機構としては、和田らにより双輪キャスト型駆動機構を用いた全方向移動ロボット [9] や、車輪数、配置の自由度の高いオフセット型駆動輪（アクティブキャスト）を用いた全方向移動ロボット [10]~[12] が開発されている。オフセット型駆動輪は、操舵軸から車輪の転がり方向に一定距離離れた位置に駆動車輪を有す

るキャスト構造をとっていて、操舵軸と駆動輪を独立にモータで制御することにより、平面内での任意の方向への運動を実現している。しかし、操舵軸と駆動輪を個別のモータで制御するため、モータの運用率の面で以下の問題がある。なお、モータの運用率は搭載されている各モータの定格出力の総和に対する各モータの動作時の平均出力で定義しており、この値が大きいほどモータを有効に使用している、すなわち同じ動作を実現するのに小出力のモータでよく、小型化が可能になると考えられる。

前進に代表される一定の動作を続けている間は、駆動用モータのみが動作して操舵用モータがアイドル状態になる。一方、方向転換等の動作を行う際には、瞬間的に操舵用モータに対して高負荷がかかる。すなわち、たまにしか動かないからといって操舵用モータの出力を低くするわけにはいかず、駆動用モータと操舵用モータの双方に高出力のものが必要になる。その結果、モータの運用率が悪くなり、モータの総出力（総質量）が必要以上に大きくなってしまふ。

本研究では、この問題を解決するため、特殊なギア機構を用いて二つのモータの出力を干渉させることにより、モータの運用率を向上させるオフセット型駆動輪を開発し、比較的低出力のモータで構成可能な全方向移動ロボットを実現することを目指す。なお、双輪キャスト機構においても構造的に同様の効果が期待できるが、双輪キャスト機構においては別途受動輪が必要になる点と駆動輪が二輪に限定されてしまう点が問題となる。提案する方式では、オフセット駆動輪の利点をそのまま生かしつつ、双輪キャスト機構のように駆動時にも操舵時にもすべてのモータを有効に利用することが可能となる。

原稿受付 2008 年 6 月 16 日

^{*1}岐阜工業高等専門学校

^{*2}豊橋技術科学大学

^{*1}Gifu National College of Technology

^{*2}Toyohashi University of Technology

■ 本論文は学術性で評価されました。

2. 動作原理

本章では、まずオフセット型駆動輪による全方向移動の原理を説明した後、それを有効に実現するために本論文で提案する2種類の差動駆動操舵機構の動作原理について述べる。

2.1 オフセット型駆動輪を用いた全方向移動機構

Fig. 1 にオフセット型駆動輪を示す。地面に固定された座標系 $O-XY$ に対して $O_w-X_wY_w$ はキャスタに固定された座標系で、操舵軸を原点 O_w とし、車輪の進行方向と X_w 軸が一致するように設定する。これにより、車輪の状態は $O-XY$ 座標系における O_w の位置 (x_w, y_w) と、 X 軸に対する X_w 軸の角度 θ_s により表すことができる。

半径 r の駆動輪を回転速度 ω_w で回転させることにより X_w 軸方向の移動速度 $\dot{x}_w = r\omega_w$ が発生し、操舵軸を回転速度 ω_s で回転させることにより Y_w 軸方向の移動速度 $\dot{y}_w = s\omega_s$ が発生する。ここで s は操舵軸とタイヤ接地点との間に存在する X_w 軸方向のオフセットである。操舵軸を回転速度 ω_s で回転させた際に、タイヤ接地点の摩擦で運動が拘束されるため、その反作用として操舵軸に Y_w 軸方向の速度 $\dot{y}_w$ が発生する。 ω_w , ω_s を制御してこの $\dot{x}_w$, $\dot{y}_w$ の大きさを変化させることにより、任意の方向、大きさの二次元並進速度ベクトルが生成する。

Fig. 2 に、初期状態で前方を向いているオフセット型駆動輪を右に向かって横移動させるときの動作を示す。車輪接地点の軌跡は曲線を描いているものの、 $\dot{x}_w$, $\dot{y}_w$ の値を適切に制御すれば、操舵軸すなわちそこに固定されているロボット本体を真横に並進させることができる。

全方向移動機構の各車輪レベルでは、 $\dot{x}_w$, $\dot{y}_w$ が制御可能、もしくは従動できればよく、機構の向きは制御する必要がない。そのため、車輪の状態ベクトル $\mathbf{x}_w$ 、入力ベクトル $\mathbf{u}_w$ はそれぞれ $\mathbf{x}_w = [x_w, y_w]^T$, $\mathbf{u}_w = [\omega_w, \omega_s]^T$ と表すことができ、順運動学式は

$$\dot{\mathbf{x}}_w = \mathbf{B}_w \mathbf{u}_w \quad (1)$$

ただし、

Fig. 1 Offset steered driving wheel

Fig. 2 Lateral motion to right

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} r \cos \theta_s & -s \sin \theta_s \\ r \sin \theta_s & s \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

となり、逆運動学式は

$$\mathbf{u}_w = \mathbf{B}_w^{-1} \dot{\mathbf{x}}_w \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{B}_w^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \cos \theta_s & \frac{1}{s} \sin \theta_s \\ -\frac{1}{s} \sin \theta_s & \frac{1}{r} \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。

二次元平面を任意の方向へ瞬時に移動可能なホロノミック全方向移動ロボットの3自由度の動作を実現するには、このオフセット駆動輪を2輪以上用いばよい。また、モータ数を減らしたい場合は、このオフセット駆動輪を二つのモータで任意の数だけ同期駆動させて、さらに回転機構を車両に追加することにより、三つのモータでの3自由度動作が実現できる。

2.2 傘歯車型差動駆動操舵機構 (DDSS Type D)

本論文で提案する差動駆動操舵機構 (Differential-Drive Steering System: 以降 DDSS) とは、二つのモータと差動歯車機構を用い、車輪の駆動と操舵を行う機構である。差動歯車機構に二つのモータから入力を与え、駆動、操舵の二つの出力を制御する。

DDSS には傘歯車型 (Type D) と遊星歯車型 (Type P) がある。傘歯車型は自動車に用いられているデファレンシャルギア機構と同じ構成になっていて、**Fig. 3** に示されるように傘歯車 A , B , C およびキャリア D からなり、歯車 A , B の歯数 Z_A , Z_B が等しい。

二つのモータからの入力、自動車であればタイヤが取り付けられる A , B にそれぞれ入力され、駆動出力は C から、操舵出力は D から出力される。入力 A , B に逆方向に同じ大きさの回転速度を入力すると、 D は回転せず C のみ回転して、駆動成分のみ出力される。Fig. 3 に示す A , B , C , D それぞれの回転速度を ω_A , ω_B , ω_C , ω_D とし、 A , B , C それぞれの歯数を Z_A , Z_B , Z_C とすると、駆動成分のみの場合は

$$\omega_A = -\omega_B = \frac{Z_C}{Z_A} \omega_C \quad (5)$$

$$\omega_D = 0 \quad (6)$$

となる。一方、入力 A , B に同方向に同じ大きさの回転速度を入力すると、 C は回転せず D のみ回転して、操舵成分のみ出力される。

$$\omega_A = \omega_B = \omega_D \quad (7)$$

Fig. 3 DDSS Type D

$$\omega_C = 0 \quad (8)$$

駆動および操舵成分が混在する運動に関しても、モータ入力 $\mathbf{u}_P = [\omega_A, \omega_B]^T$ により、駆動・操舵出力 $\mathbf{u}_w = [\omega_w, \omega_s]^T$ を独立に制御することが可能となる。その順運動学式は

$$\mathbf{u}_w = \begin{bmatrix} \omega_C \\ \omega_D \end{bmatrix} = \mathbf{B}_D \mathbf{u}_P \quad (9)$$

ただし、

$$\mathbf{B}_D = \begin{bmatrix} \frac{Z_A}{2Z_C} & -\frac{Z_A}{2Z_C} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

となり、逆運動学式は

$$\mathbf{u}_P = \mathbf{B}_D^{-1} \mathbf{u}_w \quad (11)$$

ただし、

$$\mathbf{B}_D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z_C}{Z_A} & 1 \\ -\frac{Z_C}{Z_A} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となる。

2.3 遊星歯車型差動駆動操舵機構 (DDSS Type P)

次に、同じ動作を実現するための別の機構を提案する。その基本構造は Fig. 4 のように、減速機として利用されている 2K-H 型遊星歯車機構と同等の構成となっている。中心のサンギア A、最外周のリングギア B、サンギアとリングギアに挟まれたプラネタリギア C およびプラネタリギアを支えるプラネタリキャリア D から構成されていて、C は A、B とかみ合っており、C の軸は D によって支持されている。一般的な遊星歯車減速機として使用する場合にはどれか一つの回転体を固定して 1 入力 1 出力とするが、提案する遊星歯車型 (Type P) の DDSS では何れも固定しない 2 入力 2 出力システムとする。

Fig. 4 の遊星歯車機構を用いた DDSS の基本構造を Fig. 5 に示す。E はプラネタリキャリア D を保持する車体で、二つのモータは E に固定される。二つのモータからの入力はそれぞれ A、B に入力され、駆動出力は C から、操舵出力は D から出力される。C は傘歯車により回転方向を 90° 変えられ、車輪を回転させる。

ここで、 $\omega_D = 0$ の場合は駆動のみ出力される。Fig. 4 のように A、B、C、D それぞれの回転角速度を ω_A 、 ω_B 、 ω_C 、 ω_D

とし、A、B、C それぞれの歯数を Z_A 、 Z_B 、 Z_C とすると、以下の関係式が成り立つ。

$$\omega_A = -\frac{Z_B}{Z_A} \omega_B = -\frac{Z_C}{Z_A} \omega_C \quad (13)$$

$$\omega_D = 0 \quad (14)$$

一方、 $\omega_C - \omega_D = 0$ となる場合は操舵のみ出力される。これは、操舵のみを出力する場合には、C と D が一体となって回転して、駆動成分が 0 になるためである。この場合は

$$\omega_A = \omega_B = \omega_C = \omega_D \quad (15)$$

と、すべての角速度が等しくなる。

運動学式を以下に示す。モータ入力 $\mathbf{u}_P = [\omega_A, \omega_B]^T$ から駆動・操舵出力 $\mathbf{u}_w = [\omega_w, \omega_s]^T$ を求める順運動学式は

$$\mathbf{u}_w = \begin{bmatrix} \omega_C - \omega_D \\ \omega_D \end{bmatrix} = \mathbf{B}_P \mathbf{u}_P \quad (16)$$

ただし、

$$\mathbf{B}_P = \begin{bmatrix} -\frac{Z_A Z_B}{Z_C(Z_A + Z_B)} & \frac{Z_A Z_B}{Z_C(Z_A + Z_B)} \\ \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} & \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \end{bmatrix} \quad (17)$$

となり、逆運動学式は

$$\mathbf{u}_P = \mathbf{B}_P^{-1} \mathbf{u}_w \quad (18)$$

ただし、

$$\mathbf{B}_P^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{Z_C}{Z_A} & 1 \\ \frac{Z_C}{Z_B} & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

となる。

さらに、A、B、C、D それぞれに加わるトルク T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D の関係は

$$\begin{bmatrix} T_C \\ T_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Z_C}{Z_A} & \frac{Z_C}{Z_B} \\ \frac{Z_A + Z_C}{Z_A} & \frac{Z_A + Z_C}{Z_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_A \\ T_B \end{bmatrix} \quad (20)$$

と表すことができる。ただし、各トルクの正方向は Fig. 4 の回転方向と同一である。

オフセット駆動輪を用いた全方向移動機構においては、一般

Fig. 4 DDSS Type P

Fig. 5 Mechanism of DDSS Type P

に動作方向を変えるときに操舵軸を動作させる必要があるが、定常動作（並進動作、曲率一定の回転動作）においては操舵速度 $\omega_s (= \omega_D) = 0$ となる。使用頻度が高くなり高いと想定されるこの定常動作では $\omega_D = 0 (= T_D)$ となるため、

$$T_A = -\frac{Z_A}{Z_B} T_B \quad (21)$$

$$T_C = -\frac{2Z_C}{Z_A} T_A \quad (22)$$

$$T_D = 0 \quad (23)$$

となり、各回転速度は

$$\omega_A = -\frac{Z_C}{Z_A} \omega_C \quad (24)$$

$$\omega_B = \frac{Z_C}{Z_B} \omega_C \quad (25)$$

$$\omega_D = 0 \quad (26)$$

となるため、出力 P_A , P_B の比は

$$\begin{aligned} P_A : P_B &= T_A \omega_A : T_B \omega_B \\ &= \left(-\frac{Z_A}{Z_B} T_B \right) \left(-\frac{Z_C}{Z_A} \omega_C \right) : T_B \frac{Z_C}{Z_B} \omega_C \\ &= 1 : 1 \end{aligned} \quad (27)$$

となる。なお、操舵のみの出力 ($T_C = 0$) の場合は、式 (15)、(20) より

$$P_A : P_B = Z_A : Z_B \quad (28)$$

となる。サンギアの径 Z_A とプラネタリギアの径 Z_C を同じにした場合、サンギアとリングギア Z_B の径の比は $Z_A : Z_B = 1 : 3$ となるため、 $P_A : P_B = 1 : 3$ となる。

2.4 提案二方式の相違点およびモータ運用率

本論文では2種類のDDSSを提案しているが、それぞれ以下の特徴を有している。遊星歯車型 (Type P) は構造上 $Z_A \neq Z_B$ となるため、式 (28) より操舵時には $P_A \neq P_B$ となり、二つのモータ出力を等しくすることができない。モータ出力を等しくするためには、傘歯車型 (Type D) を用いる必要がある。一方、遊星歯車型は傘歯車型に比較して機構の全高が低い、出力軸の交差がないなど、構造面で優れている。車両の仕様、制作上の条件に応じ、より適した型を採用すべきである。

次に、このモータ運用率に基づいた提案機構と従来機構（駆動と操舵を別のモータで行う方式）の比較を示す。なお、本論文ではモータ運用率 δ を

$$\delta = \frac{(\text{各モータの動作時の平均出力の総和})}{(\text{各モータの定格出力の総和})} \quad (29)$$

と定義する。また、それぞれの機構で搭載する二つのモータの定格出力比 ($P_{A0} : P_{B0}$) については、傘歯車型 (Type D)、遊星歯車型 (Type P) とともに 1:1 とし、従来方式についても文献 [10] の値 1:1（駆動モータ：操舵モータ）を用いる。

δ の値を基本動作である直進（横、斜め方向への並進を含む）、回転中心が一定の回転動作について考える（これらの動作では、駆動出力のみで操舵出力がない）。必要となる全モータ出力を P

とすると、それを実現するのに必要となるモータ出力は傘歯車型 (Type D)、遊星歯車型 (Type P) とともに $P_{A0} = P_{B0} = \frac{P}{2}$ となり、 $\delta = \frac{P}{P_{A0} + P_{B0}} = 1$ となる。これに対して、従来方式では $P_{A0} = P_{B0} = P$ となるため、 $\delta = \frac{P}{P_{A0} + P_{B0}} = 0.5$ となる。一方、操舵出力のみで駆動出力がない場合は、傘歯車型で $P_{A0} = P_{B0} = \frac{P}{2}$, $\delta = 1$, 従来方式で $P_{A0} = P_{B0} = P$, $\delta = 0.5$ となる。遊星歯車型では式 (28) より出力 P の 3/4 を P_{B0} で負担することになり、 P_{A0} は P_{B0} と等しいので、 $P_{A0} = P_{B0} = \frac{3P}{4}$, $\delta = 0.67$ となる。操舵出力のみの場合に遊星歯车型的の運用率がやや低くなるが、何れにしても従来方式より高い値となっている。なお、 P_{A0} に対する P_{B0} の比率を大きくすれば操舵出力のみの δ は大きくなるので (1:3 で $\delta = 1$ 。ただし、駆動出力のみの $\delta = 0.67$ となる)、その中間的な比率をとって全体の運用率を上げることも可能である。ただし、実際の動作において操舵出力が大きくなるのは、動きだしのキャスト姿勢を調整するときのみである。

モータ運用率が高いことより、提案方式は従来方式に比べてモータを有効に使用している、すなわち同じ動作を実現するのに小出力のモータでよく、小型化が可能になると考えられる。

3. 全方向移動ロボットの構成

提案した2種類のDDSSのうち、車高を抑えることができ、移動ロボットベースとして構成が容易な遊星歯車型 (Type P) の試作機を製作し、機構の動作確認を行った。その外観を Fig. 6 に、基本仕様を Table 1 に示す。

二つのモータの回転はベルトによりサンギア A とリングギア B に伝達され、遊星歯車機構により駆動および操舵トルクを生成している。

この車輪を四つ使用して設計した全方向移動車の外観を Fig. 7 に、その主な仕様を Table 2 に示す。100 [kg] の荷重を搭載し

Fig. 6 Prototype DDSS Type P

Table 1 Specification of DDSS Type P

Size (D × W × H)	300 × 150 × 300 [mm]
Weight	11 [kg]
Motor power	150 [W] × 2

Fig. 7 Omnidirectional vehicle

Table 2 Specification of omnidirectional vehicle

Size (D × W)	600 × 600 [mm]
Weight	70 [kg]
Motor power	150 [W] × 8
Max. velocity	6 [km/h]
Max. acceleration	0.5 [m/s ²]
Max. slope angle	10 [deg]
Max. step difference	60 [mm]
Max. loading weight	100 [kg]

Fig. 8 Control system of omnidirectional vehicle

た状態で, 10° の登坂能力, 最大加速度 $0.5 \text{ [m/s}^2\text{]}$ と 60 [mm] の段差乗り越え能力を実現できる出力のモータを選定している。

Fig. 8 にはその制御系の構成を示す。External Controller において車両の軌道生成を行い, Vehicle Level Controller において車両の軌道から各車輪位置での二次元速度を求めた後, 各車輪の Wheel Level Controller によって式 (3) および式 (18) から二つのモータの指令速度に変換する。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション方法

機構設計/デザイン用 CAD ソフトウェア SolidWorks [13] を用いて各構成部品のモデル化および質量特性解析を行い, 機構解析ソフトウェア DADS [14] にてユニットモデルを構築した後, シミュレーションにて DDSS Type P の有効性を検証した。

SolidWorks の質量特性算出機能を使用して, 各軸回転体の質量, 重心, 慣性モーメントを求めた。また, モータ, ギアボックスなど, DADS モデルに含まれない慣性は等価慣性モーメントを求め, モデルに補正値を与えた。Table 3 に, 駆動時 (旋回台を固定した場合) と, 操舵時 (車輪を固定した場合) のそ

Table 3 Inertia moment

	Sun Motor	Ring Motor
Drive	$2.59 \times 10^{-2} \text{ [kg m}^2\text{]}$	$2.59 \times 10^{-2} \text{ [kg m}^2\text{]}$
Steer	$5.43 \times 10^{-2} \text{ [kg m}^2\text{]}$	$6.03 \times 10^{-3} \text{ [kg m}^2\text{]}$

Table 4 Viscous friction coefficient

	Sun Motor	Ring Motor
Drive	$7.23 \times 10^{-5} \text{ [Nmms/rad]}$	$7.23 \times 10^{-5} \text{ [Nmms/rad]}$
Steer	$3.00 \times 10^{-3} \text{ [Nmms/rad]}$	$1.00 \times 10^{-3} \text{ [Nmms/rad]}$

Table 5 Gear ratio

	Sun Motor	Ring Motor
Motor-Steer Out	$\frac{52}{3}$	52
Motor-Drive Out	$\frac{104}{3}$	$-\frac{104}{3}$

Fig. 9 Control system of DDSS

れぞれのモータ出力軸における慣性モーメントを示す。本パラメータは DADS のシミュレーション結果から求めた。

なお, 車輪半径 $r = 80 \text{ [mm]}$, オフセット量 $s = 50 \text{ [mm]}$ とし, 駆動, 操舵の転がり抵抗係数はそれぞれ, 2998.8 [N mm] , 624.8 [N mm] とした。また, 粘性摩擦抵抗はベアリングのみ考慮した。Table 4 に, 駆動時と操舵時のそれぞれのモータ出力軸における等価粘性摩擦抵抗係数を示す。Table 5 に操舵のみの場合と駆動のみの場合についての, サンモータ A, リングモータ B から各出力軸までの減速比を示す。

Fig. 9 に一輪モデル (Fig. 8 における一輪分の Wheel Level Controller + Omnidirectional Vehicle) のブロック線図を示す。指令速度 $\dot{x}_r, \dot{y}_r$ を与えることにより, 各変換行列, モータモデルを経て, DADS にて作成したユニットモデルに各モータトルク T_{G1}, T_{G2} が入力される。そして, モータ回転数から機構の速度 $\dot{x}, \dot{y}$ を求めている。 θ_s は Fig. 1 で示した車輪の操舵角度である。これに基づきシミュレーションを行った。

サンプリングタイムを 10 [ms] , 最高速度を 6 [km/h] ($\approx 1.67 \text{ [m/s]}$) とし, 最大加速度である $0.5 \text{ [m/s}^2\text{]}$ にて加速し, 5 秒後に $-0.5 \text{ [m/s}^2\text{]}$ で減速する台形速度入力を +X 軸方向, -X 軸方向, +Y 軸方向, -Y 軸方向に与えて, 一輪モデルの挙動を検証した。なお, すべてのケースで初期姿勢は車輪の向きが +X 軸方向 ($\theta_s = 0$) となるようにしている。

4.2 シミュレーション結果および考察

Fig. 10~13 にシミュレーション結果を示す。順に +X, -X, +Y, -Y 方向への並進移動 (θ_s の初期値はすべて 0) の結果である。 V_x は X 軸方向速度 [m/s] , V_y は Y 軸方向速度 [m/s] ,

Fig. 10 Simulation results ($V_x = 6$ [km/h], $V_y = 0$ [km/h])

Fig. 12 Simulation results ($V_x = 0$ [km/h], $V_y = 6$ [km/h])

Fig. 11 Simulation results ($V_x = -6$ [km/h], $V_y = 0$ [km/h])

Fig. 13 Simulation results ($V_x = 0$ [km/h], $V_y = -6$ [km/h])

ω_{Ms} はサン側モータ角速度 [rad/s], ω_{Mr} はリング側モータ角速度 [rad/s], ω_w は車輪角速度 [rad/s], ω_s は操舵角速度 [rad/s] である.

シミュレーション結果より, すべてのケースではほぼ指令通りの動作が実現されていることが分かる. 走行距離約 8 [m] に対して, 横方向の誤差は 6 [cm] 以内に収まっている. また, 例えば Fig. 11 では車輪の初期姿勢と逆方向への運動になるので, 動き始めのところで操舵角速度 ω_s が大きな値になっていることが確認できる. この ω_s の大きさは, 指令速度によって決定する. 今回のシミュレーションでは単純な台形速度指令としたため, 動作開始時の ω_s がかなり大きな値になっているが, これを小さくしたい場合は, 台形速度ではなく動作開始時の加速度が小さくなるような速度指令値を用いればよい.

ただし, 慣性, 摩擦の影響から, 車輪角速度, 操舵角速度の遅れ, 位置の定常偏差が生じている. 本機構では, 駆動と操舵で慣性, 摩擦が異なるため, これに対応できるコントローラの設計が重要である. ユニタリ変換行列で操舵角度 θ_s を用いているため, 操舵が行われると, その操舵を戻す入力が与えられ, 定常状態においては二つのモータの追従性の違いによる影響は抑えられる.

5. 結 言

ホロノミック全方向移動のためのオフセット型駆動輪において, モータ運用率を高くすることが可能な差動駆動操舵機構を 2 種類提案した. 2 種類の DDSS のうち, 車高を抑えることができ, 移動ロボットベースとして構成が容易な遊星歯車型 (Type P) の試作機を製作して, その動作確認を行うとともに, シミュレーションによってその有効性を検証した. さらに, 提案した機構を用いた全方向移動ロボットの設計を行った.

今後の課題としては以下の点があげられる.

- 全方向移動ロボットの製作および走行実験
- 不整地走行時に各車輪に加わる大きな外乱を考慮した姿勢安定化制御
- 本機構の全方向移動車いすへの適用

謝 辞 本研究の一部は, 科学研究費補助金 (基盤 (C) 19560271, 北川秀夫), ならびに, 21 世紀 COE プロジェクト「インテリジェントヒューマンセンシング」(寺嶋一彦, 三好孝典) の支援の下に実施された.

参 考 文 献

- [1] M. West and H. Asada: "Design of a holonomic omnidirectional vehicle," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.97-103, 1992.
- [2] F.G. Pin and S.M. Killough: "A new family of omni-directional and holonomic wheeled platforms for mobile robots," IEEE Trans. Robot. Automat., vol.10, pp.480-489, 1994.
- [3] R. Damoto and S. Hirose: "Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle "Vuton-II" with Omni-Discs," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.14, no.2, pp.186-192, 2002.
- [4] H. Asama, et al.: "Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Mechanism," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1925-1930, 1995.
- [5] 北川秀夫, 別府達哉, 大野義則, 三好孝典, 寺嶋一彦: "全方向移動車椅子の乗り心地向上のための走行制御", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.7, pp.933-939, 2004.
- [6] 北川秀夫, 西坂晋, 三好孝典, 寺嶋一彦: "介助式全方向移動車椅子のためのパワーアシストシステムの構築", 日本ロボット学会誌, vol.23, no.3, pp.321-329, 2005.
- [7] T. Arai, E. Nakano, H. Hashino and K. Yamaba: "The Control and Application of "Omni-Directional Vehicle (ODV)"", Proc. 8th IFAC World Congress, pp.1855-1860, 1981.
- [8] 森善一, 中野栄二, 高橋隆行, 高山訓治: "新しい全方向移動台車 ODV9 の機構とその走行モードについて", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.64, no.619, pp.951-958, 1998.
- [9] 和田正義, 高木昭, 森俊二: "双輪キャスト型駆動機構を用いたホロノミック全方向移動ロボット", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8, pp.1166-1172, 2000.
- [10] 和田正義, 森俊二: "ホロノミック全方向移動ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.8, pp.1139-1146, 1997.
- [11] 和田正義: "同期キャスト駆動機構によるホロノミック全方向移動ロボットの設計と運動解析", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.784-792, 2001.
- [12] 和田正義: "アクティブキャストを用いた全方向移動ロボットのモデル化と制御", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.7, pp.1100-1107, 2007.
- [13] <http://www.solidworks.co.jp/>
- [14] <http://www.lmsjapan.com/dads.htm>

北川秀夫 (Hideo Kitagawa)

1988 年名古屋大学大学院修士課程電子機械工学専攻修了. 1990 年岐阜工業高等専門学校電子制御工学科助手. 同講師, 助教授, 豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助教授等を経て, 2008 年岐阜工業高等専門学校電子制御工学科教授. 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会の会員. (日本ロボット学会正会員)

三好孝典 (Takanori Miyoshi)

1989 年ローランド D.G (株) 入社. 1998 年豊橋技術科学大学大学院修士課程生産システム工学専攻修了 (社会人入学), 2001 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程電子情報工学専攻修了, 2002 年ローランド D.G (株) 退社, 豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系講師. 2005 年助教授を経て現在准教授. 計測自動制御学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本鋳造工学会, IEEE の会員. 博士 (工学). (日本ロボット学会正会員)

大野 貴 (Takashi Ohno)

2004 年豊橋技術科学大学エコロジー工学課程卒業. 2005 年同大学大学院生産システム工学専攻修士課程に入学. 2007 年同大学同専攻修了. 2007 年アイシン・エイ・ダブリュ株式会社に入社. 現在に至る.

寺嶋一彦 (Kazuhiko Terashima)

1981 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 1982 年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助手. 講師, 助教授を経て 1994 年教授, 現在に至る. 1991 年 9 月~1992 年 9 月ドイツミュンヘン工科大学客員研究員. システム制御理論とその応用, ロボティクスに関する研究に従事. システム制御情報学会, 日本機械学会, 日本鋳造工学会, IEEE 等の会員. (日本ロボット学会正会員)