

3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発

浅間 一^{*1} 佐藤 雅俊^{*2} 嘉悦 早人^{*1}
尾崎 功 一^{*1} 松元 明弘^{*2} 遠藤 勲^{*1}

Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DoF Decoupling Drive Mechanism

Hajime Asama^{*1}, Masatoshi Sato^{*2}, Hayato Kaetsu^{*1},
Koichi Ozaki^{*1}, Akihiro Matsumoto^{*2} and Isao Endo^{*1}

A new driving mechanism for holonomic omni-directional mobile robots is designed, which enables 3 DoF (degrees of freedom) motion control in two dimensional space by three correspondent actuators in a decoupled manner without redundancy. The kinematics of the omni-directional mobile robot is also analyzed to prove that driving motion by the actuators is decoupled by the developed mechanism into 3 DoF motion of the robot. A prototype of the omni-directional mobile robot with the driving mechanism is developed including a parallel link suspension mechanism. Finally, the performance of the prototype robot is shown through experimental results, by which the working of the designed mechanism is verified.

Key Words: Omni-directional Mobile Robot, 3 DoF Decoupling Drive Mechanism, Holonomic Robot, Locomotion, Kinematics, Parallel Link Suspension

1. はじめに

狭い環境で移動するロボットや複数台で協調動作を行う移動ロボット[1]には、高い移動性が要求される。脚型移動ロボットは、その制御が複雑であるのに比べ、車輪型移動ロボットは、機構が簡単かつ制御が容易であり、平地走行には適している。しかるに、従来のほとんどの車輪型移動ロボットは、非ホロミックな拘束によって、自在な移動性は得られず、その経路計画は複雑であった。そこで、高い移動性を有する車輪型移動ロボットとして、ホロミックな全方向移動ロボットが注目されるようになった。

全方向移動ロボットでは、平面上を移動するのに3自由度(並進2自由度, 旋回1自由度)が必要となる。これまで開発されたホロミックな全方向移動ロボットはいくつかのタイプに分類できるが、それぞれ駆動機構と制御の点で欠点があった。まず、これまで開発されたホロミックな全方向移動ロボットには、1方向にだけ駆動力を発生できるような、フリーローラを有する特殊車輪(あるいはクローラ)がよく使われる。このような三つの特殊車輪を120度ごとに配置し、各車輪をそれぞれのアクチュエータで駆動する方式[2][3]では、三つのアク

チュエータの回転運動が、各移動自由度方向の運動に対して干渉して作用する。したがって、各移動自由度方向の運動を制御するには、その運動速度をアクチュエータの回転速度に変換する必要がある。またこのような場合、並進安定性が機構的に得られないので、安定な並進走行をさせようとするとは複雑な制御が必要となる。このような方式では、3点接地となるので、重心の位置が高いと不安定になるといった欠点もある。一方、四つ特殊車輪(あるいはクローラ)を用いる方式[4]~[6]では、4輪接地による安定性が得られるものの、各車輪軸をそれぞれのアクチュエータで駆動すると1自由度冗長となってしまう。したがって、各移動自由度方向の制御を行うのに、各車輪の回転速度が一意には求まらない、整合性を保ちながら(同期させて)4輪を制御する必要がある、などの問題がある。さらに、球状の車輪を用い、摩擦によって駆動力を伝達する機構[7][8]では、球を駆動する際の摩擦とすべりのトレードオフによって、摩擦駆動のための押しつけ力の調整が難しい、すべりを補償するための複雑な制御機構が必要となる、などの問題が生じる。

そこで我々は、三つのアクチュエータによって4輪を駆動し、各移動自由度方向の運動を独立に制御できる駆動伝達機構を考案し、これを組み込んだホロミックな全方向移動ロボットを開発したので、これについて報告する。本機構は、4輪接地の安定性と三つのアクチュエータのみを用いる非冗長性を両立させた点に特長があるが、それに加え、特定方向への安定した並進走行、各自由度独立駆動による容易なプログラム開発なども本機構の重要な特長となっている。本研究では、機構に工夫を

原稿受付 1995年2月13日

^{*1}理化学研究所

^{*2}東洋大学

^{*1}The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

^{*2}Toyo University

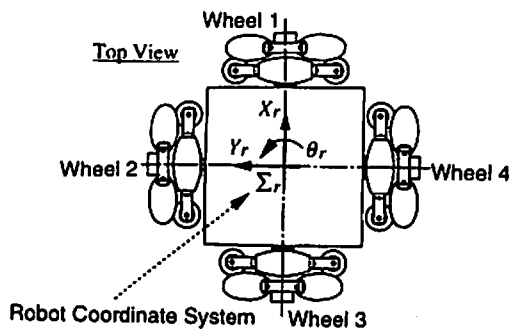


Fig. 1 Arrangement of wheels

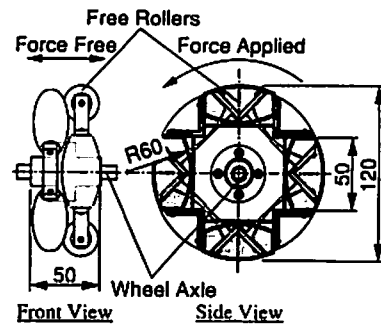


Fig. 2 Structure of a wheel

することによって走行特性を向上させ、それによって制御を容易にし、さらには制御プログラムの開発も容易にすることが可能になる、との基本的立場をとる。

2. 3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの機構設計

2.1 基本設計

本全方向移動ロボットの基本設計過程について述べる。まず、4輪接地の安定性を重視し、移動ロボットは4輪で走行することとした。特に、車輪は、全方向性を考慮し、その回転軸は90[deg]ごとに、1点で交差するように点対称に配置することとした。ただし、各車輪は、車輪軸と垂直な方向だけに駆動力を発生できなければならない(車輪軸と平行な方向には力を発生してはならない)ので、各車輪には、フリーローラを有する特殊な車輪を用いることとした。

移動ロボットが平面上を移動する場合、その移動自由度は並進2自由度、旋回1自由度となる。平面上に鉛直方向をZ軸方向として座標系を設定すると、その移動ロボットの運動は、X方向の並進速度、Y方向の並進速度、Z軸回りの旋回速度として表される。Fig.1に示すように、車輪軸の方向とX軸およびY軸の方向が一致するようにロボット上にロボット座標系 Σ_r を設定する。対向する(逆方向を向く)2輪の車輪軸を逆回転方向(時計方向および反時計方向)に駆動することによってその2輪は同じ並進方向へ回転し、安定した X_r 軸方向および Y_r 軸方向への並進運動が可能になる。例えば、車輪2および4の車輪軸を逆回転方向に駆動すると、 X_r 軸方向への駆動力を発生する。このとき、車輪1および3の接地点における X_r 軸方向の摩擦力は、フリーローラによって非常に低くなる。これによって、移動ロボットは X_r 軸方向に安定した並進運動を行うことができる。また、4輪をすべて同じ回転方向に駆動することによって Z_r 軸回りの旋回運動 θ_r が可能になる。

2.2 車輪部の設計

本研究で設計したフリーローラを有する特殊な車輪をFig.2に示す。この機構は、全方向移動ロボット用として一般的に用いられているものと基本的には同じ構造となっている[9]。この車輪は、4個の楕形のフリーローラを持つプレートを2枚組み合わせて構成されている。各プレートの4個のフリーローラは、その外形が車輪の曲率と一致するように90[deg]ごとに配置されている。プレート2枚を45[deg]ずらして組み合わせることによって、合計8個のフリーローラの外側の包絡線が、車

輪の外形を形成している。これにより、車輪は、接地点まで一定の距離(車輪の半径)を保ちながら、連続的な床との接地が可能となる。車輪の外径は120[mm]である。

また、ある程度の床面の凹凸に対しても、4輪がそれに追従して接地するように、各車輪にサスペンション機構を設けることとした。特殊車輪を用いるには、車輪軸を常に水平に保つ必要がある。そこで、ここでは、車輪軸が水平を保ちながら上下に可動するよう、各車輪を平行リンクによって支持する一般的機構を採用することとした。

2.3 3自由度独立駆動伝達機構の設計

三つのアクチュエータによって4輪を駆動し、各移動自由度方向への移動を可能とする非冗長な運動伝達機構を考案、設計した。三つの各アクチュエータの回転が、 X_r 方向の並進運動、 Y_r 方向の並進運動、 Z_r 軸回りの旋回運動 θ_r にそれぞれ独立に作用する点が本機構の最大の特徴である。

Fig.1において、一つのアクチュエータを駆動することによってロボットを X_r 方向へ並進運動させるには、車輪2,4にその駆動力を逆回転方向に伝達させる必要がある。ただし、旋回しながら並進を行わせる場合、車輪2と車輪4に速度差を生じさせる必要がある。そこで、デファレンシャル機構を用いて、そのアクチュエータの回転駆動力を車輪2,4に伝達させることとした。 Y_r 方向への並進運動に関しても、デファレンシャル機構を用いて、別のアクチュエータの回転駆動力を車輪1,3に伝達させることとした。

一方、さらに別のアクチュエータを駆動することによって Z_r 軸回りの旋回運動 θ_r を行わせるには、その駆動力を車輪1,2,3,4を同時に同方向に伝達させる必要がある。そこで、ロボットの中心にそのアクチュエータを配置し、その駆動力を傘歯車によって移動ロボット全体を回転させるように全車輪に伝達させることとした。ここで、並進運動の際の対向する車輪の速度差こそが旋回速度となることから、旋回運動用のアクチュエータからの出力が、デファレンシャル機構の速度差に入力されるようにすればよいことが分かる。並進運動については、 X_r 方向および Y_r 方向の合計二つのデファレンシャル機構があれば十分となるが、旋回運動については、傘歯車を介して四つの車輪軸を同時に駆動する必要がある。機構上四つのデファレンシャル機構を各車輪軸に取り付ける必要がある。そこで、対向する二つのデファレンシャル機構の並進入力と同じ速度になるように連結することによって、二つの冗長なデファレンシ

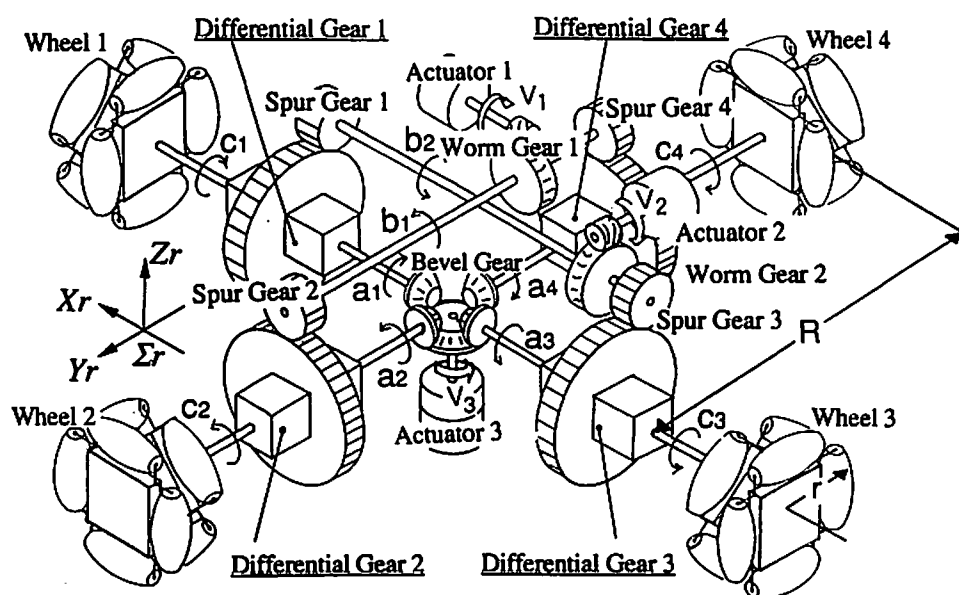


Fig. 3 Transmission mechanism of the omni-directional mobile robot

ル機構の動作を拘束することとした。

以上の考察に基づき、設計した3自由度独立駆動伝達機構をFig. 3に示す。アクチュエータ1を駆動すると、その駆動力はウォームギヤ1、平歯車2、4、デファレンシャルギヤ2、4に伝達され、車輪軸2、4は逆方向に回転する。これによってロボットは X_r 方向に並進運動する。同様に、アクチュエータ2を駆動すると、車輪軸1、3は逆方向に回転し、ロボットは Y_r 方向に並進運動する。また、アクチュエータ3を駆動すると、その駆動力は、傘歯車、デファレンシャルギヤ1、2、3、4を介して、すべての車輪軸は同方向に回転する。これによってロボットは Z_r 軸回りに旋回運動 θ_r を行う。この機構を用いると、 X_r 方向および Y_r 方向への並進運動は、平行な2輪を単一のアクチュエータで同時に駆動することによって実現できるので、その安定性は高くなる。

本機構を用い、三つのアクチュエータを駆動することによって、 X_r 方向の並進運動、 Y_r 方向の並進運動、 Z_r 軸回りの旋回運動 θ_r を冗長性なしに、独立にかつ直接制御し、ロボットを全方向移動させることが可能となる。また、当然ながら複数のアクチュエータを同時に駆動することによって、各移動自由度方向の運動を合成した動作を行わせることが可能である。特に、旋回しながら並進する動作に対してはデファレンシャル機構が有効に働く。したがって、本機構によって、ホロミックな全方向移動を実現することが可能となる。

また、屋内環境で移動ロボットを用いる場合、一般的には屋内環境の各自由度方向へ並進運動させる状況がかなり多いと予想されるが、本機構を用いることにより、特定の方向(X_r 方向および Y_r 方向)に対する走行安定性が得られるので、屋内環境で本ロボットを制御することが容易になる。また、屋内環境の各自由度方向の動作を直接指定できるので、直感的に制御プログラムを作成でき、プログラミングが容易になる。

2.4 ロボット座標系における運動学

Fig. 1で設定した座標系における運動学を明らかにすることによって、三つのアクチュエータが各移動自由度方向の運動に独立に作用していることを示す。Fig. 3においてアクチュエータ3から各デファレンシャルギヤに続くシャフトの回転速度を a_1, a_2, a_3, a_4 、アクチュエータ2およびアクチュエータ1からウォームギヤを介して平歯車、デファレンシャルギヤに続くシャフトの回転速度を b_1, b_2 、さらに、各デファレンシャルギヤから車輪へと続くシャフトの回転速度を c_1, c_2, c_3, c_4 とする。また、アクチュエータの回転速度を V_1, V_2, V_3 とする。ロボットのトレッド幅の1/2を R 、車輪半径を r とする。各回転速度変数の間には、以下の関係式が成り立つ。

$$b_1 = k_1 \cdot V_1$$

$$b_2 = k_1 \cdot V_2$$

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = k_3 \cdot V_3$$

また、デファレンシャルギヤの特性から、各ギヤの速度の変数の間には、以下のような関係式が成り立つ。

$$-2b_1 \cdot k_2 = a_1 + c_1$$

$$2b_2 \cdot k_2 = a_2 + c_2$$

$$2b_1 \cdot k_2 = a_3 + c_3$$

$$-2b_2 \cdot k_2 = a_4 + c_4$$

ただし、 k_1, k_2, k_3 はそれぞれ、ウォームギヤ1、2の減速比、平歯車1、2の減速比、傘歯車の減速比である。これを解くことによって、各車輪の速度は以下のように求められる。

$$c_1 = -2k_1 k_2 V_2 - k_3 V_3$$

$$c_2 = 2k_1 k_2 V_1 - k_3 V_3$$

$$c_3 = 2k_1 k_2 V_2 - k_3 V_3$$

$$c_4 = -2k_1k_2V_1 - k_3V_3$$

以上から、ロボット座標系におけるロボットの各移動自由度方向の速度は、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} r\dot{x} &= \frac{r}{2}(c_2 - c_4) = 2k_1k_2rV_1 \\ r\dot{y} &= \frac{r}{2}(c_3 - c_1) = 2k_1k_2rV_2 \\ r\dot{\theta} &= \frac{r}{4R}(-c_1 - c_2 - c_3 - c_4) = k_3\frac{r}{R}V_3 \end{aligned}$$

すなわち、

$$\begin{aligned} r\dot{p} &= \begin{pmatrix} 2k_1k_2r & 0 & 0 \\ 0 & 2k_1k_2r & 0 \\ 0 & 0 & k_3\frac{r}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} \\ &\equiv rJ\dot{q} \end{aligned} \quad (1)$$

と表せる。ただし、 $r\dot{p}$ は、ロボット座標系におけるロボットの移動速度 $[r\dot{x}, r\dot{y}, r\dot{\theta}]^T$ 、 \dot{q} は各アクチュエータの回転速度 $[V_1, V_2, V_3]^T$ 、 rJ はロボット座標系におけるヤコビ行列である。この式で、ヤコビ行列 rJ が対角行列となっていることから各自由度方向の運動に対し、各アクチュエータが独立に作用していることが証明された。ちなみに、逆運動学の式は

$$\dot{q} = rJ^{-1} r\dot{p}$$

となるが、 rJ が対角行列であるために、その各成分の逆数をとるだけで rJ^{-1} の各成分を容易に求めることができる。

3. 全方向移動ロボットの試作

3.1 試作機の開発

本研究で設計した車輪および伝達駆動機構を装備する全方向移動ロボットの試作を行った。Fig. 4 に、その試作機の外観を示す。また、Fig. 5 に、平行リンクを用いたおのこの車輪のサスペンション機構を示す。試作機の仕様は、車幅：410[mm]×410[mm]、車高：176[mm]、重量：11.6[kg]となった。

3.2 試作機を用いた走行実験

試作機を用いて走行実験を行った。ただし、今回の実験では、Fig. 6 に示すような制御システムを用いた。

まず、ロボットの並進走行特性を調べるために、アクチュエータ1のみによる X_r 方向、アクチュエータ2のみによる Y_r 方向、さらにアクチュエータ1および2による X_r - Y_r 斜め45[deg]方向への並進走行実験を行った。それぞれについて、1[m]~5[m]まで1[m]間隔で位置目標値を設定し、PTP位置制御実験を行い、目標値における位置および姿勢の誤差を計測した。その実験結果を、Fig. 7~Fig. 9 に示す。これらのグラフは、移動距離(横軸)に対する位置および姿勢の誤差(縦軸)を表している。各測定点は、走行実験を3回繰り返して行った測定値の平均値を示している。実験結果から、各軸方向への並進走行については、5[m]以内の移動距離に対して誤差が30[mm]以内となり、比較的精度がよいことが分かったが、斜め方向への

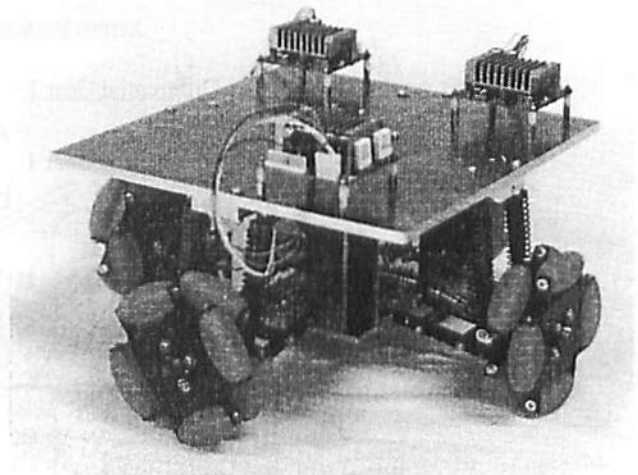


Fig. 4 Overview of a prototype robot

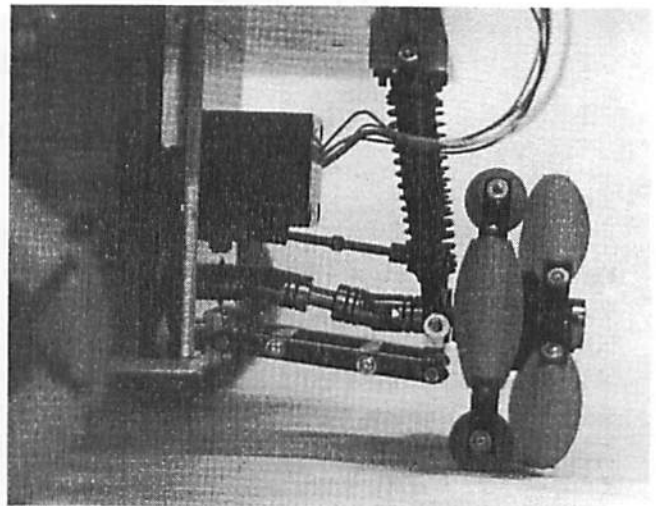


Fig. 5 Parallel link suspension

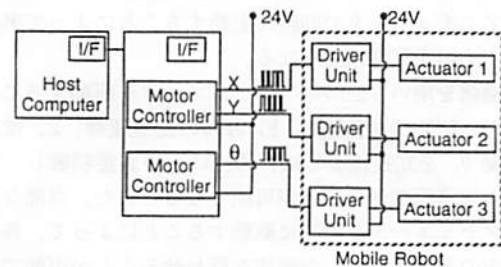


Fig. 6 Architecture of the omni-directional robot

並進走行については、5[m]の移動距離に対して66[mm]の誤差が生じ、精度が悪いことが明らかになった。

次に、ロボットの旋回走行特性を調べるためにアクチュエータ3のみによる Z_r 回りの旋回走行実験を行った。60[deg]~360[deg]まで60[deg]間隔で回転角目標値を設定し、PTP位置制御実験を行い、目標値における姿勢の誤差を計測した。その実験結果を、Fig. 10 に示す。上述の実験同様、このグラフ

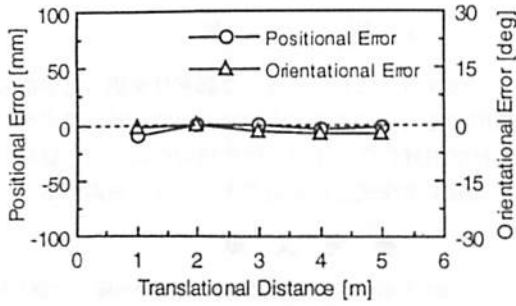


Fig. 7 Error in translational motion along X_r -axis

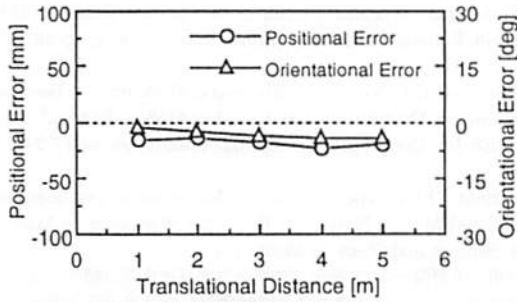


Fig. 8 Error in translational motion along Y_r -axis

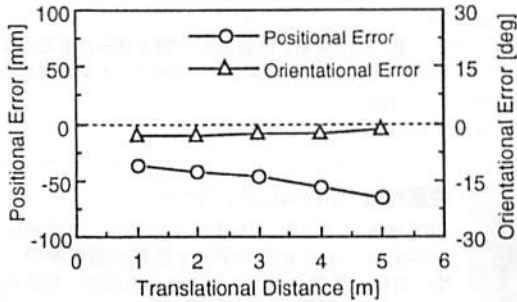


Fig. 9 Error in translational motion along X_r - Y_r -axis

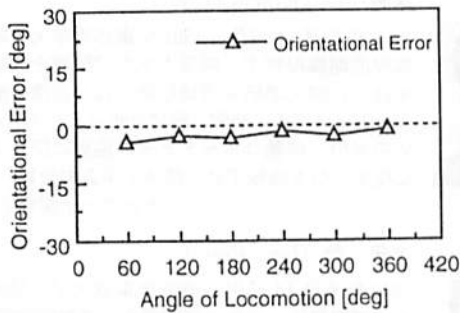


Fig. 10 Error in rotational motion about Z_r -axis

は、移動距離（横軸）に対する姿勢の誤差（縦軸）を表しており、各測定点は、走行実験を3回繰り返して行った測定値の平均値を示している。実験結果から、360 [deg] 以内の回転角度に対して5 [deg] 以内の誤差で旋回走行が可能であることが明らかになった。

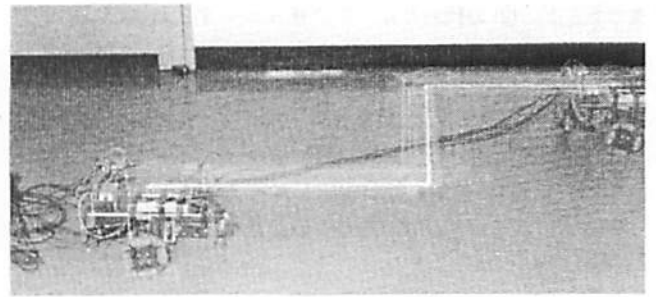


Fig. 11 Example motion 1

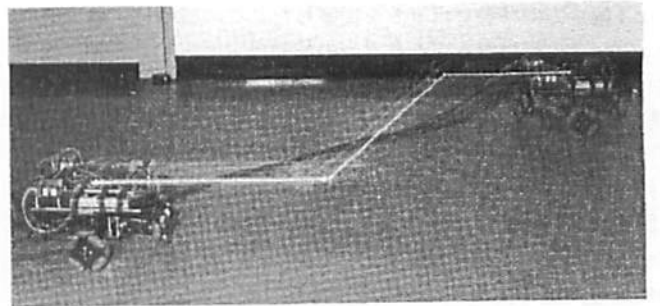


Fig. 12 Example motion 2

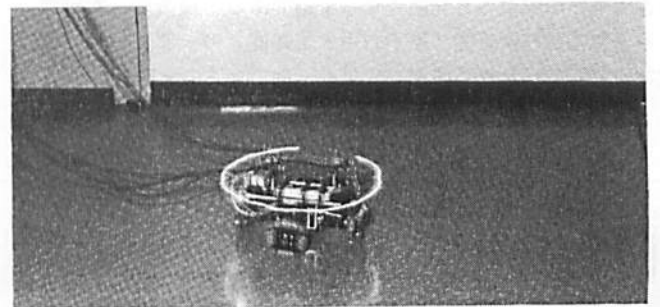


Fig. 13 Example motion 3

これらの実験結果では、ロボットの移動距離および旋回角度の誤差はいずれも負であり、目標値に達していないことが分かる。これは、車輪のすべり、伝達機構のバックラッシュなどが主な誤差の原因であると考えられる。また、接地点（接地しているのは内側のローラか、外側のローラか）によってトレッドの値が多少変化することも、その原因の一つとして挙げられる。ただし、オープンループでの制御実験であったことを考慮すると、この誤差は十分許容できる妥当な値と考えられ、今後、機構的改良やフィードバック制御系の適用などによって、誤差の低減を図ることが可能であると考えられる。

さらに、走行軌道の評価を行うために、並進および旋回走行の位置制御実験を行い、その軌跡を記録した。試作機にLEDを点灯させながら走行させ連続撮影した実験結果を Fig. 11~ Fig. 13 に示す。Fig. 11 は、(1) アクチュエータ1のみによる X_r 方向への並進走行、(2) アクチュエータ2のみによる Y_r 方向への並進走行、(3) アクチュエータ1のみによる X_r 方向への並進走行という一連の走行結果である。Fig. 12 は、Fig. 11 と

同様であるが、(2)の代わりに、アクチュエータ1および2による X_r - Y_r 斜め 45 [deg] 方向への並進走行を行った走行結果である。Fig.13 はアクチュエータ3のみによる Z_r 回りの旋回走行の結果である。これらの軌道から、各アクチュエータによる各自由度方向の並進走行、旋回走行、アクチュエータ1および2による斜め方向の並進走行が安定して行えることが確認された。特に X_r 方向および Y_r 方向への並進は走行安定性が高いことが明らかになった。

4. おわりに

3自由度独立駆動伝達機構およびそれを組み込んだホロノミックな4輪全方向移動ロボットを提案した。この機構は、各アクチュエータの駆動力を、それぞれの移動自由度方向の運動に独立に作用するように、4輪に伝達することが可能であるので、4輪の安定性、3アクチュエータの非冗長性を両立させることができる。またそれに加え、本機構は安定した並進走行、それに伴う制御の容易性、各自由度独立駆動による容易なプログラム開発などの特長も合わせ持っている。実際に、全方向移動ロボットを試作し、走行実験によって3自由度独立駆動伝達機構の機能を実証し、ロボットの走行特性を明らかにした。今後、機構的改良を行うとともに、位置・速度制御を行うための電装系やセンサシステムを開発し、さらには複数台のロボットによる協調動作の実現へと発展させる予定である。最後に、本研究は原子力基盤技術研究「原子力用人工知能」の一部として、理化学研究所で行われた研究の成果の一部であることを記す。

5. 謝 辞

本ロボットの機構設計において貴重な御意見を賜った宇都宮大学工学部横田和隆氏、埼玉大学大学院琴坂信哉氏、クボタトレン株式会社富田昇吾氏、また、試作機製作において御協力いただいた日化機工業株式会社岡崎重夫氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- [1] 浅間 一：“複数の移動ロボットによる協調行動と群知能”，計測と制御，vol.31, no.11, pp.1155-1161, 1992.
- [2] B. Carlisle: "An Omni-Directional Mobile Robot," Development in Robotics, IFS Publ. Ltd., pp.79-87, 1983.
- [3] F.G. Pin and S.M. Killough: "A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 10, no. 4, pp.480-489, 1994.
- [4] P.F. Muir and C.P. Neuman: "Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robots," Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1772-1778, 1987.
- [5] B. Rembold: "Kinematic Control of a Mecanum Wheel based Omnidirectional Mobile Platform," Proc. 2nd Workshop on Manipulators, Sensors and Steps to Mobility, 1988.
- [6] 広瀬茂男, 天野信一：“大荷重高効率全方向移動車両の開発”，日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会 '93, pp.350-355, 1993.
- [7] M. West and H. Asada: "Design of Ball Wheel Vehicles with Full Mobility, Invariant Kinematics and Dynamics and Anti-Slip Control," Proc. ASME Design Technical Conference, 23rd Mechanisms Conference, 1994.
- [8] 飯田慎二, 竹田 滋, 松本直樹, 伊藤正篤：“球を使った全方位移動機構及びその制御”，日本ロボット学会第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp.79-84, 1993.
- [9] “オムニ α”，富士製作所カタログ, 1993.



浅間 一 (Hajime Asama)

1959年1月18日生。1984年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補，現在研究員。自律分散型ロボットシステム，複数移動ロボットの協調，群知能，ロボットの評価，バイオプロセスの知能化技術の開発に従事。工学博士。IEEE，ニューヨーク科学アカデミー，精密工学会，日本機械学会，化学工学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)



嘉悦早人 (Hayato Kaetsu)

1948年10月30日生。1971年東京理科大学中退。1971年理化学研究所同位元素研究室勤務，1981年同化学工学研究室へ移籍。同位体分離の研究，分散型ロボットシステムに従事，前任技師として現在に至る。日本原子力学会，日本機械学会，精密工学会の会員。



松元明弘 (Akihiro Matsumoto)

1958年6月8日生。1983年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学修士課程修了。1983年東京大学工学部助手，1988年東洋大学工学部講師，1990年同大助教授，現在に至る。工学博士。1994-1995年ルイバスツール・ストラズブル第1大学(フランス)訪問研究員。ロボット言語，自律分散型ロボットシステムの研究に従事。精密工学会，日本機械学会，IEEEの会員。
(日本ロボット学会正会員)



佐藤雅俊 (Masatoshi Sato)

1970年5月4日生。1994年東洋大学工学部機械工学科卒業。現在東洋大学大学院博士前期課程在学中。自律分散型ロボットシステムの研究。特に移動ロボットの設計・開発，移動ロボットとその協調に関する研究に従事。



尾崎功一 (Koichi Ozaki)

1967年6月10日生。1992年東洋大学大学院博士課程前期課程修了。埼玉大学大学院博士後期課程を経て，理化学研究所奨励研究員。自律分散型ロボットシステムの研究，特にロボットシステムのための通信，移動ロボットとその協調に関する研究に従事。日本機械学会，精密工学会の会員。
(日本ロボット学会正会員)



遠藤 勲 (Isao Endo)

1940年8月14日生。1970年東京大学工学研究科博士課程修了。理化学研究所化学工学研究室勤務，現在，同主任研究員。1989年より埼玉大学理工学研究科客員教授兼任。生物工学，特にバイオプロセスエンジニアリングの研究に従事，1978年化学工学協会論文賞受賞，1994年ヘルシンキ工科大学名誉工学博士，ニューヨーク科学アカデミー，アメリカ化学工学会，アメリカ化学会，化学工学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)