

遊星歯車型差動駆動操舵機構を用いた全方向移動車の開発

Development of Omnidirectional Vehicle Using Planetary-Gear-Type Differential Drive Steering Mechanism

○中田竜輔*, 熊谷正朗**

○Ryusuke Nakata*, Masaaki Kumagai**

*東北学院大学 大学院, **東北学院大学

*Graduate School of Tohoku Gakuin University, **Tohoku Gakuin University

キーワード : 遊星歯車 (planetary gear), アクティブキャスタ (active caster), 全方向移動 (omnidirectional movement), 差動駆動操舵機構 (differential drive steering mechanism)

連絡先 : 〒 984-0075 仙台市若林区清水小路 3-1 東北学院大学 工学部 ロボット開発工学研究室
熊谷正朗, Tel.: 022-354-8716 E-mail: kumagai @ mail.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

1.1 研究の背景

現在, 人の代わりにロボットが荷物を運搬することが多くなってきており, 様々な分野での運搬ロボットの活用が見られるようになってきている. 一方で, 建築現場へのロボット導入の様々な試みもあることに比べ, 資材の運搬分野では依然として例は少ない. 建築のような日常的に重量物を運んでいる現場では体に負担がかかる場面が多く, その自動化は大きな効果がある. また, 近年少子高齢化が進む社会ではどうしても人手不足や労働者の高齢化が解決すべき大きな問題になる.

そこでこのような人の負担を減らし, 人手不足の解消につながるようなロボットを開発したいと考え, 本研究を行おうと考えた.

1.2 研究の目的

本研究では, 建設現場で建材をほぼ自律して搬送できるロボットの開発を最終的な目標とした. 路面としては土や草地などの不整地ではなく, コンクリート打ちなどある程度の固い乾燥面を想定するが, 完全な整地でもなく, 砂粒・小かけら・塵埃などはあるものとする. 搬送対象としては重量のあるものを想定し, 長尺物などは複数台での搬送も視野にいたした. また, 比較的頻繁に環境が変わること, および現場での運用のわかりやすさから, 移動については (a) 人間の作業従事者の移動に追従しての搬送, (b) 経路を示すような目標ポストを立て, それをたどるようなナビゲーションを行うことを検討する.

本稿ではこのうち, 移動車輻としてハードウェアの開発について報告する. この想定条件から, 移動車には全方位への並進・旋回を可能とする全方向移動車であることが求められ, 以下に示すような検討によってアクティブキャスタ

形式を用いた四輪ステアリングロボットとすることとした。

1.3 アクティブキャスト式を選定した理由

アクティブキャストは車輪移動ロボットの一種態であり、モータ等の駆動により能動的に回転する車輪に、能動的に操作できる操舵機構を加えたものである¹⁾。それゆえ一つの車輪ユニットは能動的な2自由度を持つ。一般に操舵方向には角度制限がなく、また車輻の移動にともなって操舵軸の回転が続くことも想定される。それゆえ、アクティブキャストの機構については複数の方式が提案されているが、多くは車輪走行駆動用のモータを車輪に直接とりつけることはなく、操舵機構よりも上流側(車体側)に置いたモータの動力を、何らかの機構によって操舵機構を通して、車輪へと伝える。駆動用のモータを車輪に直接取り付けた場合は、配線が巻き付かないように工夫して電力を伝える必要があるが、それによる操舵の制限が生じる形態のほか、大出力化を想定するとスリップリングや非接触給電を使いにくいことから、機械式となっている。1ユニットで2自由度であるため、平面移動の3自由度を得るには、アクティブキャストを2台と、動力を持たない従動式のキャストによる構成が最小となる。

本研究ではアクティブキャスト式の車輪ユニットを4台用いた四輪ロボットとした。まず、アクティブキャストを採用した理由は、想定環境による。アクティブキャストは車輪そのものは通常の(円盤形)車輪であるため、床面に応じて適したタイヤ等を選択することができ、強度を高めた機械設計もしやすい。また、常に車輪の移動方向にその円周を向けることから、路面凹凸への耐性も得やすい。移動ロボットの分野では、全方向移動性のある車輻として、メカナムホイールやユニバーサルホイール(通称オムニホイール)を車輪に用いる構成がしばしば用いられる²⁾。しかし、これらの車輪は平面・平滑な

路面以外には適さない。たとえば、メカナムホイールは4輪セットで用いるが1輪でも浮くと(接地荷重が大きく低下すると)想定した挙動が得られなくなる。また、これらは車輪外周に小径のローラを複数配置することで他の車輪の能動駆動の妨害をしない構造であるが、そのローラの回転方向には対路面の半径がローラの半径となるため車輪そのものの見た目の半径に対してかなり小さくなり、路面の凹凸の影響を受けやすくなる。加えて、隙間も多いため塵埃などが入りやすく、本研究で想定した環境には適さない。

アクティブキャストには複数の方法があるが、上記の通り、動作の制限を避けるため、2個のモータから機構を通して操舵と車輪駆動を行う方式とすることにした。また、車輻の安定性を考えて4輪式とし、すべてをアクティブキャストとした。最低数は2個であるが、4輪以上の車輻では路面の凹凸で一部の車輪が浮き上がる、または接地荷重が減少することから、駆動輪の浮きや駆動に必要な摩擦力の低下が想定される。以上により、システムのコストの上昇や質量の増加はあるものの、全車輪を能動とすることとした。

2. 原理と操舵機構の設計

本研究では参考文献に示す全方向移動車のための差動駆動操舵機構の研究³⁾で提案されていた遊星歯車型差動駆動操舵機構の原理を用いた、モータ2個で駆動・操舵の2出力を得る遊星歯車機構を採用した。本節でその原理を説明する。

2.1 遊星歯車型差動駆動操舵機構の原理

この操舵機構の基本構造を Fig. 1 に示す。一般的な遊星歯車機構同様に、太陽歯車 A、内歯車 B、遊星歯車 C の3個の歯車で構成されており、モータから太陽歯車と内歯車それぞれに動力を与え回転させる。内歯車の回転軸を支持す

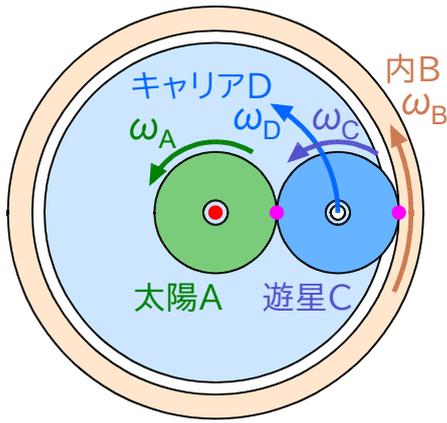


Fig. 1 遊星歯車型差動駆動操舵機構の原理図. 一般的な遊星歯車機構を2入力2出力の干渉駆動に用いている. 入力は太陽歯車Aと内歯車Bであり, 出力は遊星歯車Cの移動(キャリアD)とその回転である.

るキャリアにあたるDの回転と, その上での遊星歯車Cの回転が出力となり, 本機構ではDを操舵として用い, Cを車輪に導いて走行動力とする.

A, B, C, Dのそれぞれの角速度を $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ とし, 図中の矢印の向きを正とする. また, 各歯車の歯数を Z_A, Z_B, Z_C とする.

操舵と車輪駆動のそれぞれについて, 望ましい出力を得るための入力の回転(逆運動学)を考える. まず, 操舵については, 太陽歯車Aと内歯車Bが同期して回転すれば, 遊星歯車Cを挟んだまま回転し, そのキャリアであるDも回転するので,

$$\begin{aligned}\omega_A &= \omega_D \\ \omega_B &= \omega_D\end{aligned}\quad (1)$$

である.

つぎに, 車輪駆動を得るための入力, 太陽Aと遊星Cが接するところ(図中紫点)でピッチ円で周速度が一致し, 遊星Cと内歯車Bの接するところでも同様である. 歯車のピッチ円半径はその歯数 Z とモジュール m に対して, $mZ/2$ で与えられるため,

$$(mZ_A/2)\omega_A = -(mZ_C/2)\omega_C$$

$$(mZ_B/2)\omega_B = (mZ_C/2)\omega_C \quad (2)$$

であり,

$$\begin{aligned}Z_A\omega_A &= -Z_C\omega_C \\ Z_B\omega_B &= Z_C\omega_C\end{aligned}\quad (3)$$

を得る. なお, 負号は図の角速度の正方向の規定による.

これらは単純に加算することができるため,

$$\begin{aligned}\omega_A &= \omega_D - (Z_C/Z_A)\omega_C \\ \omega_B &= \omega_D + (Z_C/Z_B)\omega_C\end{aligned}\quad (4)$$

を得る.

参考文献³⁾によると, 本手法は

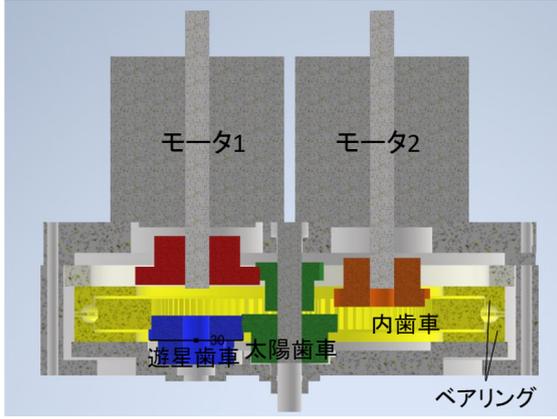
$$\delta = \frac{\text{各モータの動作時の平均出力の総和}}{\text{各モータの定格出力の総和}} \quad (5)$$

で規定されるモータの運用率が, 他の手法に比べて高めであるとされている. また, 機構的な特徴として, 全体の機構の高さを抑えやすいことがあげられ, 本研究ではこの方式を使用することとした.

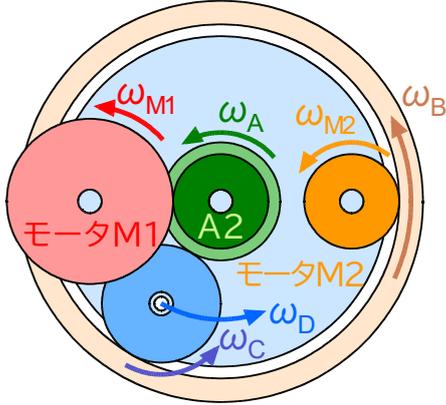
2.2 ギアボックスの設計

上記の原理はそのまま実装するには, 太陽Aと内歯車Bが同軸であって, モータ配置に難があることから, 歯車列を追加した. Fig. 2にその構造を示す. 本研究で実装した車輪駆動機構の上部構造である. Fig. 2(a)は設計したギアボックスの側面の断面図であり, (b)は歯車列の関係を平面図で示した.

2個のモータのうち, モータ1は1段の平歯車対を介して太陽歯車を駆動し, モータ2はその軸に取り付けた平歯車によって, 内歯車を駆動している. 参考とした先行研究³⁾では, モータからベルト伝導で力を伝えていたが, そのため機構部が大きくなっていったことに対して, 本設計では機構の上に外見的には対象位置にモータを並べ, 小型化した. また, 式(4)において, 走



(a) 設計した機構の横断面



(b) 歯車列の模式平面図

Fig. 2 ギアボックスの機構設計. 遊星歯車を中心として、太陽歯車及び内歯車をモータで駆動する歯車および回転と駆動系を支持する3要素大径ベアリングからなる.

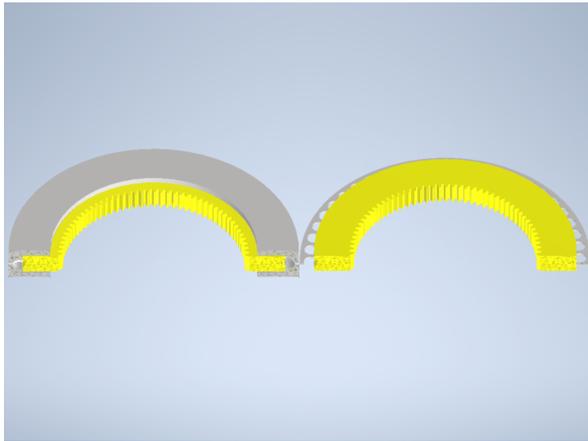


Fig. 3 ベアリング部の構造. 内歯車は支持のベアリングのインナーレースと一体化してある. ボールリテーナを溝にはめた上で模型用のφ6mmの硬質樹脂球(BB弾)を並べ、上下構造のアウタレースで挟む.

行のための出力 ω_C を出力するために、 (Z_C/Z_A) および (Z_C/Z_B) の係数があるため、太陽歯車と内歯車の歯数比だけそれぞれの要求角速度が異なるが、本設計ではそのバランスも取りやすくなる.

このギアボックスにおいて、モータ2から内歯車を駆動する歯車を $M2(\omega_{M2}, Z_{M2})$ とし、モータ1から太陽歯車を駆動する歯車列を $M1(\omega_{M1}, Z_{M1})$ および $A2(\omega_{A2}, Z_{A2})$ とする ($A2$ と A は直結しており同じ角速度 ω_A).

$$\begin{aligned}\omega_B &= (Z_{M2}/Z_B)\omega_{M2} \\ \omega_A &= -(Z_{M1}/Z_{A2})\omega_{M1}\end{aligned}\quad (6)$$

なお、内歯車はモータ2の駆動歯車と回転方向は同一、太陽歯車はモータ1に対して逆回転となる.

これを式(4)と組み合わせると、

$$\begin{aligned}\omega_{M1} &= \frac{Z_{A2}}{Z_{M1}} \left(\omega_D - \frac{Z_C}{Z_A} \omega_C \right) \\ \omega_{M2} &= \frac{Z_B}{Z_{M2}} \left(\omega_D + \frac{Z_C}{Z_B} \omega_C \right)\end{aligned}\quad (7)$$

となる.

実際の設計では、 $Z_A = Z_C = 30$, $Z_B = 90$, $Z_{M1} = 40$, $Z_{A2} = 20$, $Z_{M2} = 30$ としたため、

$$\begin{aligned}\omega_{M1} &= (1/2)(\omega_D - \omega_C) \\ \omega_{M2} &= 3\omega_D + \omega_C\end{aligned}\quad (8)$$

となった. この式を ω_C, ω_D について解くと、

$$\begin{aligned}\omega_C &= (1/4)(-6\omega_{M1} + \omega_{M2}) \\ \omega_D &= (1/4)(2\omega_{M1} + \omega_{M2})\end{aligned}\quad (9)$$

を得る.

なお、前式の係数 $(1/2)$ は太陽歯車を駆動する $M1$, $A2$ が $2:1$ (増速) となっていることに起因し、モータの動力的には本来望ましくない ($1:1$ でよい). これはギアボックスの設計において、歯車の空間干渉を避けるなどの理由によることであって、今後の改良課題である.

本設計でもう一つ特徴的な工夫は可動部を支持するベアリング構造である。本機構では操舵軸周りに相対運動する要素が、車体に固定される部分、操舵機構以降の車輪駆動部分(キャリア)、それに加えて一般的な遊星歯車減速機では固定される内歯車の三つである。車体-車輪駆動部間は、重量(車輪からの支持)を支え、駆動力(操舵軸をせん断・曲げる方向)に耐える必要があって、スラスト+アングュラ軸受けの特性が要求され、内歯車については歯車としての伝達力に耐える主に水平面内の支持が必要である。これを実現するために当初は大口径の市販ベアリングの採用を検討したが、直径が大きい一方で幅や(外径-内径)の小さな、細いリング状のベアリングは標準品に乏しく、妥当なものを選定できなかった。このことから Fig. 2(a) に黄色で示した部分に、内歯車と一体化した大径のベアリング構造を開発した。また、一体化することで、構造が薄型化して、全体で機構がコンパクトとなる利点もある。

ベアリング部分と内歯車のみを Fig. 3 に示す。内歯車の外周にはインナーレースとなる溝があり、ボールリテーナをはめた上で硬質樹脂性の $\phi 6$ [mm] の球(BB弾)を並べ、上下に分割したアウトレースで挟み込む構造である。車体側および車輪駆動部側に取り付けられる上下のアウトレース間は、深溝のスラストベアリングとなっており、鉛直方向の荷重に耐えるほか、水平方向の荷重にも十分に耐える。前述のインナーレースと一体の内歯車については主に水平方向のラジアル軸受となる構造とした。この構造ではギアボックス自体が上下方向に分離してしまうが、ケースによって制限をしている(接地時はその荷重でベアリング支持となって、ケースと回転構造は接触しない)。

Fig. 2 には構造の相対位置を規定するリング状の部材などもあり、歯車の位置調整をしている。現在の試作では多くの部品を3次元プリンタでABS樹脂によって成形しているが、市販部

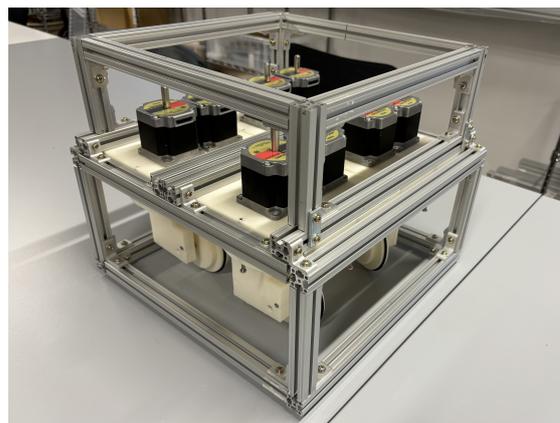


Fig. 4 開発した全方向移動ロボットの機械部分。ロボットの構造は正方形で、操舵機構の4ユニットを対称に配置してある。

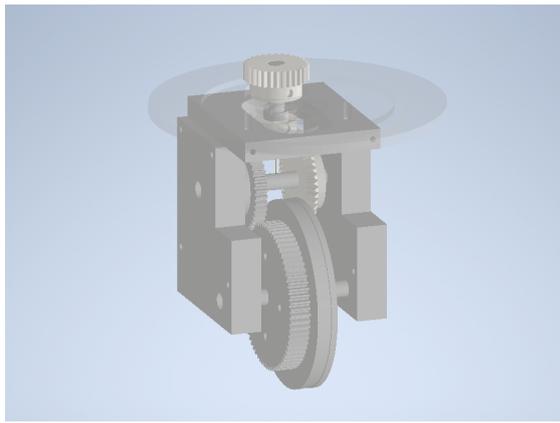
品や金属加工部品への置き換えを想定している。内歯車の厚さが他の歯車に対して薄く、十分にかみ合っていない点も、市販品の寸法を基準としたことによる。

3. 全方向移動ロボット

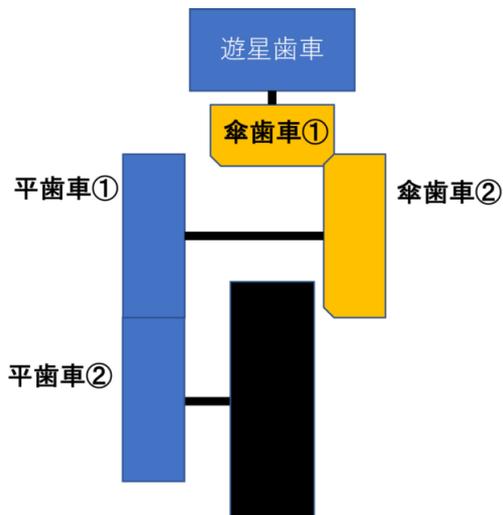
以上の差動操舵機構を搭載した全方向移動ロボットを試作した。

3.1 移動ロボットの構成

本ロボットはアクティブキャスト型の四輪車で、車輪ユニット4台をアルミフレームで組み立てた車体に固定してある。車体寸法は $\square 360$ [mm] の正方形であり、 $\square 160$ [mm] の操舵機構および車輪駆動系を4台対称に配置した。後述のように車輪の接地点は操舵機構中央の操舵軸直下であり、それゆえ接地点は160 [mm] 間隔である。正方形とした理由は移動の対称性を考慮してであり、寸法については試作した機構の寸法および、本ロボットが人と同じ作業空間で追従できるという目的からある程度の小型化を意図したためである。ロボットそのものはあまり大きくせず、長尺物、大判の板材などは複数台で搬送できれば良いとした。ロボット上部のフレームは上に搬送物を載せるため、下部のフレームは、



(a) 車輪駆動部の設計モデル



(b) 歯車の伝達機構

Fig. 5 車輪駆動部の機構. 遊星歯車による操舵機構からは、その操舵旋回軸からオフセットした位置に車輪を回転させる軸(遊星歯車の回転軸)が得られるため、歯車列によって車輪軸に導いた。

本機構そのものは障害物等への直接的接触に弱いことに対応する防護用のスカートとするために設けた。

3.2 車輪駆動部分とキャスト設計

前述のとおり、遊星歯車による操舵機構からは操舵の結果として回転する基盤(キャリアにあたる)と、その中央からオフセットした位置に車輪を回転させる軸(遊星歯車の回転軸)が得られ、ここに車輪駆動部分を接続する。Fig. 5 にその

構造を示す。図(a)は遊星歯車以下の車輪までの動力伝達機構のCAD設計であり、(b)はその機構である。傘歯車で向きを変えた後、平歯車で車輪を駆動している。傘歯車はバックラッシュが大きくなりやすいが、本機構全体で歯車列が複雑であり、使用環境を考慮しても上位層でのフィードバックは必須であることから、許容している。Fig. 5(b)に示す歯車列に対して、歯数は24:48, 42:70であり、(3/10)の減速比とした。これらの歯数はキャスト部の幾何学的構造なども考慮して決定した。車輪はOリングをタイヤとする車輪であり、設計値は $\phi 90$ [mm]である。

アクティブキャストには制御にも関わる設計パラメータとして、旋回軸と車輪軸の距離であるオフセット値がある。オフセットがゼロの場合は、旋回軸の直下(旋回軸と路面の交点、水平路面に対しては鉛直直下)でタイヤが路面と接するため、車体を移動せずにその場で車輪の向きを変えること(据え切り)が原理的には可能である(実際にはある程度の面接触であり接触部や機構の負担にはなる)。

一方、手押し台車や車輪付き椅子に用いられる通常の受動のキャストは、オフセットがある。これら受動のキャストでは、外力で押した場合に移動方向後方にキャストが自然に操舵され、車輪が移動を妨げず、移動方向に対して転動するようになるが、オフセットは車輪に働く力を操舵のトルクに変えるアームの役割をする。それゆえ、ゼロであればこの受動的な操舵はなされず、車輪移動ができないため、ある程度の大きさが必須である。大きいほど操舵されやすくなるが、接地点が滑らないことを前提とすると、接地点を中心に操舵軸がオフセットの半径で円運動することとなるため、進行方向に対して車体が左右に動く原因となる(台車、椅子を前後に動かした際に生じる)。なお、キャストが進行方向前方を向いている場合は、死点(不安定平衡点)となり、ある程度は移動するが何かのきっかけで急に操舵されて車体が揺動するが、その性

質にもオフセットは影響する。

アクティブキャストでは能動的に操舵するため、受動キャストのようにオフセットは必須ではない。死点の課題も死点の方向への操舵を維持することも可能である(むしろ、車輪が能動的に駆動されるなら、受動キャストの不安定死点方向は「引く」には妥当な車輪位置となる)。過去の事例¹⁾でもオフセットがゼロである機構もある一方で、オフセットが存在する事例もある^{3, 4, 5)}。制御上はオフセットがあっても移動計画ができる方法が示されている。

これらのことから、オフセットの決定方法を探したが、調査した範囲では有用な根拠は確認できなかった。機構が十分なバックドライバリティを持つ場合は、電源断や駆動を超える外力が作用した場合に、オフセットがあれば受動キャストと同様の挙動で逃げることにより機構の損傷や接地点の損耗を低減できる可能性がある(外力の方向が車輪の転動方向と直交する場合はその外力が直接的に機構全体に作用し続ける)。以上のことから、まずは、制御の容易なオフセットをゼロとする機構で設計したが、構造的に車軸位置の設定や最終段の平歯車の歯数等で容易に調整できる。

以上の検討の結果から設計したものが**Fig. 5(a)**に示す構造である。一見すると通常の受動キャストと似た形状で、オフセットがあるように見られるが、車輪への動力入力となる遊星歯車の軸がそもそも操舵軸とずれており(太陽歯車半径($mZ_A/2$)と内歯車半径($mZ_B/2$)の平均)、そこから車軸を操舵軸直下とするためにこのような形状となっている。

4. 制御方法

本ロボットの制御は、キャストの制御、車体の制御およびその上位の制御によって構成する。

4.1 アクティブキャストの制御

アクティブキャストの制御は、操作量がモータの速度、出力が(車体を基準とした)キャストの操舵角 ϕ と車輪の回転速度 v である。これには式(8)と、車輪の機構から、

$$\begin{aligned}\omega_D &= \dot{\phi} \\ v &= r_W(3/10)\omega_C \\ \omega_C &= (10/3)r_W v \\ \omega_{M1} &= (1/2)(\omega_D - \omega_C) = f_{M1}(v, \dot{\phi}) \\ \omega_{M2} &= 3\omega_D + \omega_C = f_{M2}(v, \dot{\phi})\end{aligned}\quad (10)$$

となる。ここで r_W は車輪半径である。ただし、これは速度の逆運動学であり、操舵角は角速度ではなく角度そのものが必須であるため、上式とは別に角度原点と ϕ の管理が必要となる。

4.2 車両の制御

車両全体では、ワールド座標系を基準として、車体の運動を位置 (x, y) と姿勢角 θ および、その速度 $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ が関心を持つ状態量となる。上位層の制御によるが、主に関心があるのは、並進速度と機体の姿勢の組み合わせ $(\dot{x}, \dot{y}, \theta)$ である。これは追従などの用途を考えるとターゲットとの距離の管理、およびその進行にあわせた移動では速度が指令として必要である一方、車体からはみ出すことになるであろう積載物を衝突させないこと、あるいは複数台で協調運搬するときに各機の相対関係を維持するためにはその姿勢角が重要となるためである。この θ については、その目標値 θ_r と現在値に対する誤差に応じて $\dot{\theta}$ を指令するような単純なフィードバック制御で実現できる。なお、この現在値 (x, y, θ) については事前の計画に基づく動作であれば絶対量が必要であるが、利用者に対する追従、利用者の操作による方向調整、複数台の協調などの場合には、現状を基準とした補正さえあれば良いので、(ある時刻の位置姿勢を基準とした)相対量でもよい。

ワールド座標系もしくはロボット座標系において、キャスト i (本機体では $i = 1, 2, 3, 4$) の操舵軸の位置を p_i 、車両運動の旋回中心 (瞬間中心) を p_c とする。全方向性のない車両では、車体に対する旋回中心の位置は、一部の固定された車軸の軸上に拘束されるが、全方向性がある車両では任意の位置に設定でき、旋回半径 (旋回中心までの距離) を ∞ とした場合には直進運動を行い、旋回中心までの方向に直交する方向がその並進速度となる。

各キャストにおいて、車輪移動の原理から、(a) 操舵角 ϕ は車軸が旋回中心の方向を向く必要があり、 $(p_i - p_c)$ に対して直交する、(2) 速度 v は車体の望ましい速度を基準として、 $|p_i - p_c|$ に比例する、必要がある。後者については、角速度はどの位置でも等しいことから、旋回中心周りの角速度と車体の角速度 $\dot{\theta}$ は一致しており、これに $|p_i - p_c|$ を乗じれば良い。なお、車輪の対称性から、 ϕ の方位は 180 [deg] 異なる二つの候補があり、それに応じて v は正負となる。直近の ϕ と連続性を考慮して決定する必要がある (たとえば、前進後退だけを切り替えたときに、操舵を 180 [deg] 回す必要は無い)。

ただ、ここで全方向であるがゆえの疑問が一つ生じる。対向 2 輪駆動 (独立 2 輪駆動) や全方向性を持たない操舵輪つき車両 (自動車、三輪車類) では、ある動作状態で (検討する時間で) 一定の角速度 $\dot{\theta}$ と並進速度 $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$ により、車両は旋回半径 $\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} / \dot{\theta}$ の円運動を行う。一方、全方向性を持つ場合は、この動作に加えて、「一定の並進速度 (\dot{x}, \dot{y}) で直線移動しつつ連続して姿勢角を θ を変えていく」 (非ゼロの $\dot{\theta}$ 、スピンしながら直線運動する) が可能なはずである。かつ、これは直線経路に沿って移動しながら (外的指令、周囲との干渉回避、協調運搬の他者との方位を維持などのために) 姿勢を変えるために必須である。これらは瞬間では同じ $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ であり、なにがその動作の違いを決定づけるかは関心事である。時刻の経過とともに、前者は

ワールド座標系、車両座標系ともに旋回中心は移動しないことに対して、後者はワールド座標系では車両と一定の距離を保ちつつ旋回中心も同速度で移動、車両座標系では旋回中心が車両の周りを一定の距離を保ちつつ $\dot{\theta}$ で回転すると想定される。連続時間式ではそれぞれ解析しようと予想できるが、実ロボットの制御では制御周期 ΔT の間には一定の動作をする、すなわち円弧運動をせざるを得ないため、後者の「回転しながら直線運動」では何らかの補正が必要なることを示唆している。ただし、制御周期が十分に短ければ、おそらくより上位のフィードバック制御で容易に対応可能な程度であり、もとより操舵式では車輪の運動の積算による自己位置推定も誤差が大きいため、重要性は低いと考えている。

以上の計算によって各モータの回転速度は得られるが、たとえば対向 2 輪駆動に比べて、各種動作に要求されるモータ速度の見積もりは複雑である。そこで、予めモータの速度上限を超えないように (保守的に) 運動計画するかわりに、ある程度の見込みでモータの速度を決定し、そのなかで各モータの上限を超えるものがあれば、全モータの速度指令値に低減係数を乗じて、上限内に納めることとした。状況によっては期待する速度より低下するが、車両速度とモータ速度には比例関係があるため、アクティブキャストの操舵角などの満たすべき幾何学条件を損なわずに動作を継続することはできる。

5. 実装と動作実験

以上をもとにロボットの機体を実装した。一部の歯車を除くと機構部品は 3 次元プリントによる ABS 樹脂製とした。モータはオリエンタルモーター社製 (PKP266D28B2, 200 [step], 最大トルク 1.4 [Nm]) を用い、東芝製 TB6560AHQ ステッピングモータ駆動 IC によってマイクロステップ駆動をし、1600 [step/rev] 相当とした

(主には振動低減のため). 電源は日立マクセル社(古河電池社に継承)製リチウムイオン電池パック 7LPL0678G8C1-1P01(25.2[V] 5.3[Ah])を搭載する. 機体制御はMicrochip Technology社製dsPIC33EP256MU806マイコンを用い, 4台のアクティブキャストの計8個のモータの指令パルスをソフトウェアによって生成している. 全キャストの特性式に対応した動作($v, \dot{\phi}$ の指令による機構の動作)を確認しており, 車両としての制御の実装を進めている.

6. おわりに

本稿では, 開発中の全方向移動車の開発について述べた.

本移動車はある程度の整地の建築現場等での資材の運搬を目的として開発したものであり, 最終的な目標はユーザへの追従や設置したガイドポストを参照しての半自律移動である. この目的から, 移動手段としてはアクティブキャスト方式とし, そのなかでも遊星歯車型差動駆動操舵機構に着目し, その実用面を考慮した実装を行った. 本手法は走行時にモータの利用効率が高いほか, 走行と同じモータで操舵も行うために操舵速度も速く, 操舵型の全方向移動機構の弱点となり得る, 移動方向の短時間の変更に対する操舵の制約ともなりにくい. また, 2重のシャフト構造なども不要で製作もしやすい.

現時点で車両の基本的な実装は終え, 制御面の検討, 実装を進めている. また, 別途開発している, 広視野角の赤外線マーカ方位計測システムの利用を想定し, 追従や経路誘導を実装していく予定である.

参考文献

- 1) 日本ロボット学会編: 第4章 移動機構—4.1.2 車輪移動機構の構成要素—アクティブキャスト, ロボット工学ハンドブック第2版, 381/381(2005)
- 2) 日本ロボット学会編: 第4章 移動機構—4.1.2 車輪移動機構の構成要素—合成型全方向車輪, ロボット工学ハンドブック第2版, 379/380(2005)
- 3) 北川秀夫, 大野貴, 三好孝典, 寺嶋一彦: 全方向移動ロボットのための差動駆動操舵機構の開発, 日本ロボット学会誌, **27**-3, 343/349(2009)
- 4) 本郷圭一, 和田正義: サスペンション付き差動駆動型アクティブキャストの開発, 第41回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2023AC1D1-02(2023)
- 5) NSK: 滑らかな全方向移動を実現する「アクティブキャスト」を開発(プレスリリース), <https://www.nsk.com/jp/company/news/2022/0225b.html>, (2023/12 閲覧)