

遊星歯車を用いた差動駆動操舵機構を有する全方向移動車輪ロボットの実装

Implementation of a Omnidirectional Wheeled Robot Using Planetary-Gear-Type Differential Drive Steering Mechanism

○正 熊谷正朗 (東北学院大) 中田竜輔 (東北学院大学大学院修了)

Masaaki KUMAGAI, Tohoku Gakuin University, kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

Ryusuke NAKATA, Graduate school of Tohoku Gakuin University (graduated)

This paper presents an implementation of an active-caster type omnidirectional robot using planetary gear as steering mechanism, which distributes two motor input via the sun gear and the internal gear into steering as the carrier motion and wheel-driving output as rotation of a planetary gear on the carrier. The idea cited from previous study is shown first with our additional idea to drive the sun and the internal gear, which makes the caster unit compact. A set of control method of caster unit and whole robot light enough to be implemented on a 16bit microcontroller with fixed-point calculation is provided with experimental demonstration in accompanied video.

Key Words: Omnidirectional wheeled robot, Planetary gear, Differential drive, Stepping motor

1 はじめに

本研究は、駆動系に遊星歯車機構を用いたアクティブキャスタ式の全方向移動ロボットの実装に関するものである。現在、移動ロボットの社会実装が様々に行われる中、中田は建設現場での資材搬送の支援を最終的な目的としたロボット開発を行った [1]。想定した仕様としては、(a) 人間作業者が通れる程度の通路でも走行できる程度のフットプリントの小型さ、(b) 人間の誘導に追従して移動できること、すなわち人間の移動速度に相当し、かつ小回りや短時間での進行方向変更ができること、(c) 路面はコンクリートを打った程度のある程度の整地環境だが塵埃等は目立つ状況、とした。たとえば、ビル等の建設でコンクリートの打設まで終わって内装を進めるような状況の想定である。大きな資材の搬送には、(d) 複数台での協調を想定する。

この目的から移動機構の検討をした。まず、移動性から、搬送ロボットで一般的に用いられる対向2輪型や通常の操舵付き4輪車では不十分で、全方向移動性を必要とした。対向2輪車に能動のターnteーブルを搭載する方法もあるが、たとえば90度の移動方向転換にはロボット本体の旋回が必要で時間を要する。つぎに車輪式の全方向移動では、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) [2] を用いる方法と、能動の旋回軸と能動の駆動軸を有するアクティブキャスタ [3] を用いる方法が種々提案されているが、前者は車輪構造が複雑で隙間に小石や塵埃が入り込むことでメンテナンスの工数が不安であること、また原理的に路面凹凸などで一部車輪が浮いた (接地荷重が大きく低下した) ときに、その移動に影響がでる場合があること、車輪の転動方向ではない方向の移動に対して、配置されたローラ等が対地の半径となるため、凹凸などに弱いことなどで適さない。そこで、車輪そのものは環境に応じた通常車輪、タイヤ類が使用できるアクティブキャスタ式を使用することとした。また、この理由に関連して、ロボットは4輪構成として、全車輪をアクティブキャスタとした。

アクティブキャスタにも種々の方法が提案されてきたが、本研究では北川らが提案した遊星歯車を用いた差動駆動操舵機構 [4] を原理として用いることとした。まず、アクティブキャスタは車輪駆動と操舵の動作が必要であり、2自由度の能動駆動が必要である。単純にはモータ付きの車輪駆動ユニットを、別の操舵機構で旋回させればよいが、車輪ユニットへの電力等の伝達をどうするかという課題 (単純に電線を使うと操舵に応じて巻き付く) と、旋回軸下の質量が大きく、操舵に慣性の影響もある。この対応として、モータを操舵軸の上 (車体に固定される側) に置き、何らかの機構で動力を伝える方法が用いられる。単純には、操舵軸を中空とし、車輪駆動の動力をその中を通す軸で伝える方法がある。この場合は、モータの役割が完全に独立するため、直線的な移動が多くなる場合は操舵のモータの動力の活用率が低くなる。

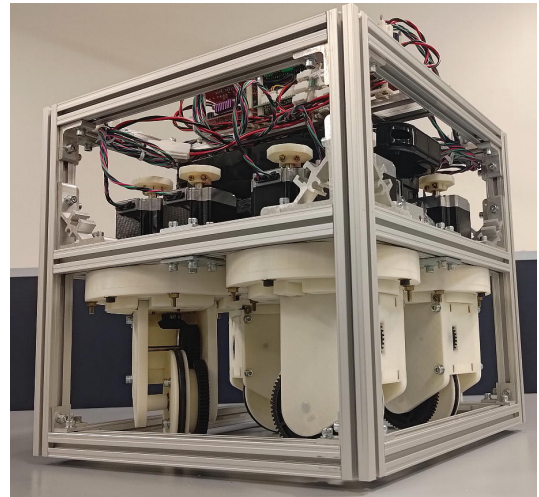
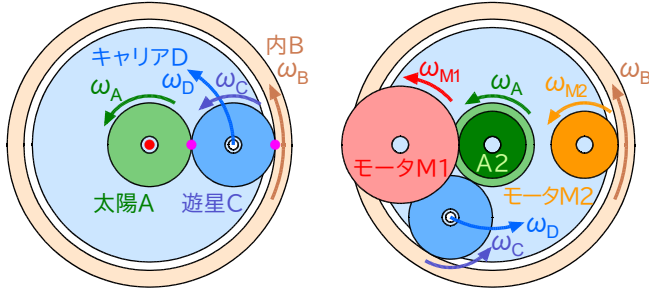


Fig.1 Omnidirectional wheeled robot with four active caster units.

また、操舵軸には、車輪軸の反トルクも作用しかねない。

これらの背景から、モータ2個を干涉駆動 [5] にし、有効活用する提案がなされてきた (文献 [6] など)。方針としては、モータ2個の駆動で、たとえばモータを同方向に回転させると協調して車輪を駆動し、逆方向に回転させると協調して操舵を動かす。これは重畳することが可能で、逆運動学によって、望ましい車輪駆動と望ましい操舵を実現するモータの回転速度を求め、モータの操作指令とすればよい。その機構にも複数があるが、北川らの方法の特徴は、(a) 干涉動作を傘歯車ではなく平歯車の遊星歯車機構によっているため、薄型かつ傘歯車で課題となるバックラッシュの影響を低減できる (機構的に必要な傘歯車は1カ所のみ)、(b) 操舵が後述のように遊星キャリアによるため、駆動および外力に対して操舵軸がねじり方向に対して機械的に強い、(c) 操舵がモータからの入力軸に匹敵する速度で駆動されるため、操舵の方向転換速度を得やすい、ことがある。そのほか、モータの稼働率が高い等の利点が文献 [4] で述べられている。

ただし、北川らの実装では、駆動系にベルトやチェーンが利用されていて機構的には複雑であること、また水平方向のフットプリントが大きいことから、モータを操舵機構の直上に置き、歯車伝達のみでコンパクトなユニットとして実装し、その原理を検証した [7]。本研究では、機構をさらに改良して開発した2号機 (図1) と、その制御について報告する。



(a) Planetary gear (b) with input gears

Fig.2 Steering mechanism using planetary gear.

2 アクティブキャストの原理と構造

2.1 遊星歯車機構によるアクティブキャスト

本ロボットの駆動部の原理は文献 [4] によるが、著者らの解釈に基づき説明する。モデル図を図 2(a) に示す。本手法の特徴は、遊星歯車機構を 2 入力 2 出力として使うことにある。遊星歯車機構は、太陽歯車、内歯車、遊星歯車、遊星キャリアからなり、一般的な減速 (増速) 機構として用いる場合は、太陽歯車、内歯車、遊星キャリアのいずれかを固定し、残り二者を入力・出力とする。遊星歯車はキャリア上の軸で自由に回転する。これに対して、本手法では、太陽歯車 (A) と内歯車 (B) を動力の入力とし、キャリア (D) を操舵の出力、キャリア上の遊星歯車 (C) の回転を車輪駆動用の出力として用いる。操舵機構より下部の車輪の支持構造はキャリアに固定し、その 1 点から出力される遊星歯車の軸を車輪に導けば良い。以下、それぞれの角速度を $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ として、図の矢印方向を正とする。また、それぞれの歯車の歯数を Z_A, Z_B, Z_C とする (必然的にモジュールは同一)。

まず、キャリアを出力とする操舵について考える。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、遊星歯車を軸で支持するキャリアも同じ角速度で回転するため、

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

である。これは望ましいキャリア (操舵) 出力 ω_D を得るために必要な 2 入力の角速度 ω_A, ω_B を示す式、すなわち機構の逆運動学にあたる。

つぎに、遊星歯車の回転 (車輪駆動出力) を得るための入力は、太陽 A と遊星 C が接するところ (図中紫点) でピッチ円周速度が一致し、遊星 C と内歯車 B の接するところでも同様に一致すればよい。言い換えれば太陽と内歯車で挟んで逆向きに相対運動することで、回転を与える。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、

$$\begin{aligned}Z_A\omega_A &= -Z_C\omega_C \\ Z_B\omega_B &= Z_C\omega_C\end{aligned}\quad (2)$$

を得る。なお、負号は図の角速度の正方向の規定による (太陽と遊星は逆回転の関係、内歯車と遊星は同方向)。

これらは単純に加算することができるため、

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

となる。

2.2 遊星歯車機構の駆動

もととなる文献では、この機構の太陽歯車と内歯車をそれぞれベルト伝動で機構の横に置いたモータによって駆動していた。上述の通り、これをコンパクトにするため、直接モータで駆動できるようにする。ただし、太陽歯車と内歯車は同軸であるため、たとえば内歯車に軸を付けようにも干渉する。そこで、太陽歯車の軸、内歯車の軸とも、モータから歯車伝動で駆動する。模式図を図 2(b) に示す。

二つのモータ (必要ならギアヘッド等の減速機を含む) の入力角速度を ω_{M1}, ω_{M2} とする。モータ 1 は歯車 M1 と、太陽歯車と結合された歯車 A2 (よって角速度は同じ ω_A) により、太陽歯車を駆動する。モータ 2 は歯車 M2 を内歯車に直接噛み合わせることで、内歯車を駆動する。それぞれの歯数、および矢印で規定した方向に基づいて、

$$\begin{aligned}\omega_A &= -(Z_{M1}/Z_{A2})\omega_{M1} \\ \omega_B &= (Z_{M2}/Z_B)\omega_{M2}\end{aligned}\quad (4)$$

である。これと先の式 (3) から、

$$\begin{aligned}\omega_{M1} &= -\frac{Z_{A2}}{Z_{M1}}\left(\omega_D - \frac{Z_C}{Z_A}\omega_C\right) \\ \omega_{M2} &= \frac{Z_B}{Z_{M2}}\left(\omega_D + \frac{Z_C}{Z_B}\omega_C\right)\end{aligned}\quad (5)$$

となる。

後述のように機構設計を行い、 $Z_A = Z_C = 30, Z_B = 90, Z_{M1} = Z_{A2} = Z_{M2} = 30$ としたため、この式に代入して

$$\begin{aligned}\omega_{M1} &= \omega_C - \omega_D \\ \omega_{M2} &= \omega_C + 3\omega_D\end{aligned}\quad (6)$$

となる。つまり、走行のために車輪を回す (遊星歯車の回転 ω_C) には二つのモータを同速度同方向に、操舵のためには逆方向に 1:3 の比で回すことになる。主に動力が必要な走行では二つのモータから同出力で分担でき、モータの定格速度の範囲が等しく活用できる。また、上式は逆運動学であり、これを解くと順運動学

$$\begin{aligned}\omega_C &= (1/4)(3\omega_{M1} + \omega_{M2}) \\ \omega_D &= (1/4)(-\omega_{M1} + \omega_{M2})\end{aligned}\quad (7)$$

となる。

以上のように、この差動機構は干涉駆動として性質がよい。以下に述べるように主に平歯車で構成されるため、実装もしやすい。明確なデメリットは内歯車が車輪駆動の伝達になっているため、走行時には相応の速度で回転する点であり、その支持や、大きな歯車であるがゆえの慣性には留意が必要である。

2.3 アクティブキャストとロボットの実装

図 3 に実装したキャストおよびロボットの外観を示す。本ロボットは水平方向が 320 [mm] の正方形で、本体部の高さは 310 [mm]、質量はバッテリー込みで約 14.5 [kg] である。また、操舵機構の CAD 図を図 4 に、操舵以下の車輪駆動部を図 5 に示す。なお、軸やベアリングは省略してある。本ギアボックスの部品は最終的には切削加工などで製作することを念頭に置きつつ設計し、今回はすべて FDM 式 3 次元プリンタで製作した。構造部品は ABS 樹脂、歯車部品はカーボンファイバ含有ナイロン樹脂である。可能な限り軸を固定し、歯車等回転部品側にベアリングを入れる設計とした。これにより、太陽歯車、車輪駆動部の大傘歯車 + 平歯車、車輪 + 平歯車を一体化して、回転軸に固定する場合の軸に対する滑りの問題を解消した。本設計は平面図上ではモータ軸の歯車が遊星機構に干渉するが、図 4 に示すように上下方向に配置して実現した。また原理上は遊星歯車は 1 個でよいが、歯車間の位置の拘束と操舵出力がガタつかないようにするため、動力を取り出さないダミーの 2 個を加えて 3 個とした。

さらに、遊星キャリア (水色) が車輪駆動部の支持基盤となる。言い換えれば自重の反力を含め、車輪部に加わる力、モーメントに耐えなければならない。そこで、図 4 で赤丸で示した位置に円形の溝を成形し、6mm の樹脂球を並べることで大口径のボールベアリングを形成した。上側が主に鉛直荷重と横方向の荷重を受ける主ベアリングで、さらに遊星機構の内歯車も支持する。下側は横方向の荷重を支えるほか、分解しないように閉じる役割を持っている (ケースがここで分割されており組立時に締め付ける)。

図 5 に示す車輪駆動部は、キャリアにフレームを固定し、遊星歯車から出力された軸を 24:48 の傘歯車で受け、42:70 の平歯車で車輪を駆動している。アクティブキャストでは、操舵軸と車軸 (すなわち接地点) の間の距離がオフセットと呼ばれる設計パラメータである。オフセットがゼロの場合は操舵で接地点が変わら

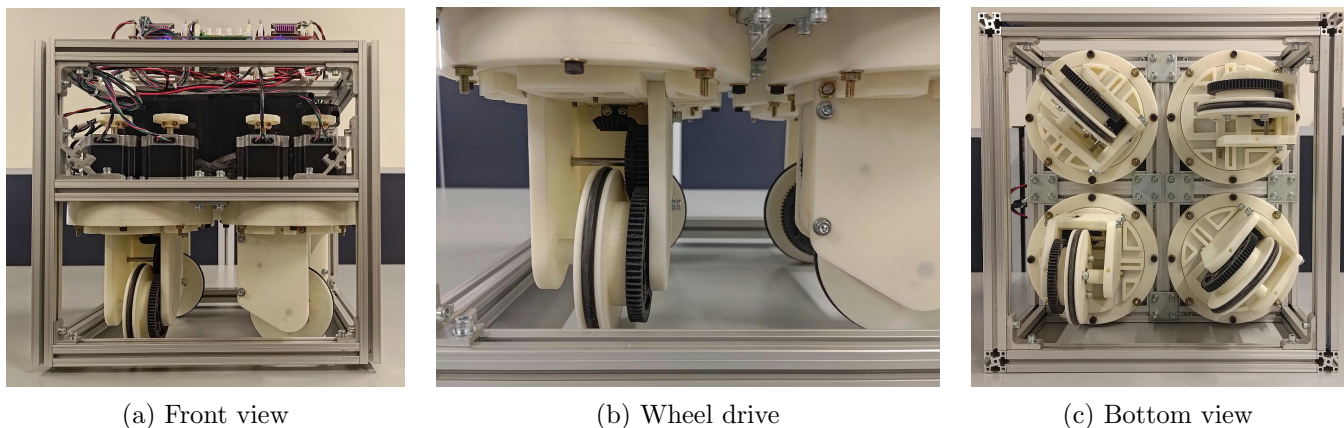


Fig.3 Detailed view of omnidirectional robot.

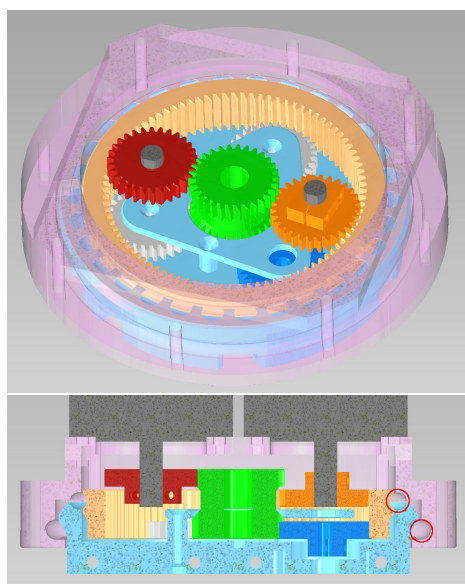


Fig.4 Implementation of the steering gearbox.

ず、操舵に特殊な演算が必要ない。オフセットがある場合は、それを加味した走行制御が必要となる。一方で、通常の受動のキャスタでは、オフセットが、外力で動かしたときに車輪が受動的に妥当な方向に操舵されるためのモーメントのアームとなる。つまりゼロでは車輪の方向が転換されず、無理な力がかかることになる。既存のアクティブキャスタに関して調査した範囲では(たとえば文献 [3] には両者示され、[4, 6, 8] はオフセットがある)、オフセットの決定指標を見つけることはできなかったため、この実装ではオフセットはゼロとした。ただし、この車輪駆動部のみ作り替えれば(車軸の位置を動かせば)オフセット有りとなる。また、キャスタにサスペンション機能を設ける [8] 場合も、ここにロッカーアームを組み込めば良い。その場合、車輪駆動の歯車にかかる駆動の反トルクがサスペンションに作用することになるため、車輪側に減速機を組み入れて伝達トルクを低減する必要があると考えられる。複数の車輪のサスペンションをリンクで接続して、沈み込みによる車体の傾斜を低減する手法などを適用するには、太陽歯車の支持シャフトを太くし、中空とすれば、ロッカーアームに上から押すような棒を通すことは可能で(現設計ではシャフトはキャリアに固定し上部ケース側にベアリングをいれてある)、アクティブキャスタ機構の上で、その手段を実装することも可能と考えられる。このような車輪部設計の観点からも、文献 [4] で提案された本手法は有用性が高いと考えられる。

メカより上部について、以下に述べる。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

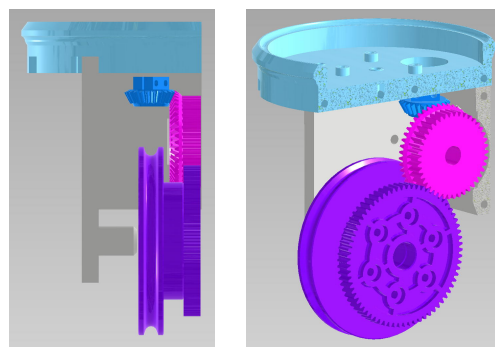


Fig.5 Implementation of the wheel drive unit.

は振動低減のため)。後述の制御方法に示すとおり、必要な要件は速度操作ができること、および回転角がわかることであるため、AC/DC サーボモータ、高分解能センサつき BLDC モータ、インテリジェントアクチュエータ等が使用できる。今回は実装を簡略化するため、ステッピングモータを採用した。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、以下の制御則を実装し、4 台のアクティブキャスタの計 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。

3 制御方法と動作試験

3.1 アクティブキャスタの制御

アクティブキャスタの制御では、走行という点では速度の出力が、操舵の点では角度の出力が必要である。本実装では干涉駆動で両者が分離されていないため、モータは速度操作としたうえで、操舵は目標操舵角に対して P 制御を行うように操舵角速度を算出するようにした。

具体的には、上位で決定するキャスタへの指令は、車輪ごとの走行速度と操舵角 (ロボット座標系における車輪を向ける方向) とする。式 (7) を積分すると、

$$\begin{aligned}\phi_C &= (1/4)(3\phi_{M1} + \phi_{M2}) \\ \phi_D &= (1/4)(-\phi_{M1} + \phi_{M2})\end{aligned}\quad (8)$$

角度に関する式となるため、モータの角度センサ値 (本実装ではステッピングモータへの指令パルスの積算) から操舵角 ϕ_D を算出できる。これと操舵指令角の差に適宜ゲインを乗じ、上限を設け、脱調を避けるための加減速の制限を加えて、操舵角速度 ω_D を得る (ゲイン、制限パラメータは実験的に調整した)。さらに、走行速度から ω_C を計算して、式 (6) でモータ速度とした。なお、キャスタ動作には対称性があるため、ある方向にある速度を出すには、操舵角は 180 度差の 2 方向が可能で、それに応じて実車輪速度の正負を変えれば良い。より近い方に操舵するようにすることで、指令に対する操舵作業は 90 度以下となる。

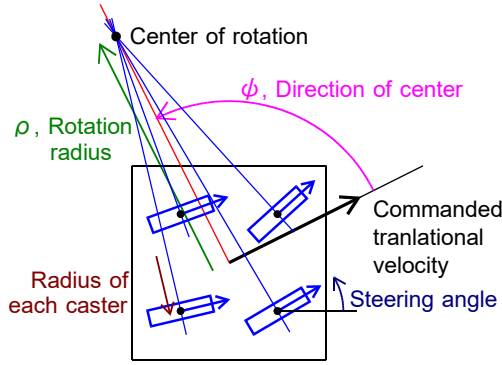


Fig.6 Vehicle model with four active casters.

さらに、4台のキャストで8個のモータの速度指令値 $\omega_{M,i}$ が算出されるが、その最大値が指定値 ω_{max} を超える場合には、比率を保ったまま制限した。

$$\omega_{M,i} = \omega_{max} \{ \omega_{M,i} / \max(|\omega_{M,i}|) \} (i = 1 \cdots 8) \quad (9)$$

実モータには速度上限がある (特にステッピングモータは脱調しやすくなる) ことと、車輪移動の性質上、車輪の速度比が維持されていれば、幾何学的な軌道には影響せず、複数車輪間の拘束に抵触しないことを意識した。さらに、操舵のゲインを大きめに設定すると、指令算出段階で各モータの走行に必要なモータ速度に比べて操舵に必要な速度が桁違いに大きくなり、その上でこの制限が適用されることで、1輪でも操舵が必要な場合は結果的に走行が抑制される。つまり、キャストのオフセットをゼロとしたことも併せて、単純に操舵角と走行速度を指令するのみで、まず操舵された上で操舵が全て完了後 (直前) に車輪が回り始めるという動作になる。たとえば、人間によるコントローラ操作での指令で急な方向転換があっても、最速で操舵して移動を継続できる。

3.2 車輪の制御

車輪移動ロボットの走行制御や操舵の方法については膨大な先行事例があるが、本実装では、ユーザー手持ち操作の無線コントローラの4自由度 (2自由度×2スティック) の指令で、車載マイコンでスタンドアロン動作をする制御を実装した。図6にその概要を示す。まず1本目のスティックの操作で、並進方向と移動速度を指定する (直交→極座標変換)。つぎに、2本目のスティックの1自由度で、旋回半径 (曲率) を指定する。操作入力に対して、中立ではば直進 (大半径)、最大に倒して半径ゼロとなるように関数でマッピングする。正負は並進方向に対する中心の左右を定める。これらにより旋回中心は、並進方向に直交する方向 ($\psi = \pi/2$) で、正負を持つ旋回半径 ρ の位置、と定められる。キャストの操舵角は、車軸が旋回中心を向くように決定する。車輪の走行速度は、4輪の最大の速度が上記指定の移動速度になるように、かつ、各車輪の速度が、各車輪 (キャスト位置) の旋回中心からの距離に比例する設定した。たとえば直進時は指定通り、半径が小さくなると内側の車輪の速度が落ち、旋回中心がロボット中心となると4輪が指定速度で回転するように、連続的に変化する。

さて、全方向性のない対向2輪型のようなロボットでは、旋回成分を持つ円弧を描く軌道に制約される。一方、全方向性があるのであれば、「旋回しながらロボット中心は直線上を移動する」ことは可能であろうか、その場合のキャストの速度指令はどうなるであろうか、という疑問が生じる。この動作はたとえば、2台のロボットで協調して長尺物を運んでいるとき、経路上の相手の位置によっては荷台の方向を変えなければならない。そこに受動／能動のターンテーブルを設ける方法もあるが、走行部だけでこれを実現することができれば有用である。

すくなくとも、ワールド座標系上でこの動作を計画するとき、各車輪の通るべき軌道は関数で算出できる。これは車輪座標系に変換すれば、その接線方向と、その速度成分からキャストが追従すべき軌道が得られることを意味する。ただし、ある瞬間に関していえば上記の車軸方向と車輪速度比の条件は満たされなければならない、瞬間ごとには円弧運動と同一であるといえる。両者の違いを図7に示す。結論は、車輪座標系で見た旋回中心の位置の変化である。単純な円弧は車体に対して常に同一方向に旋回

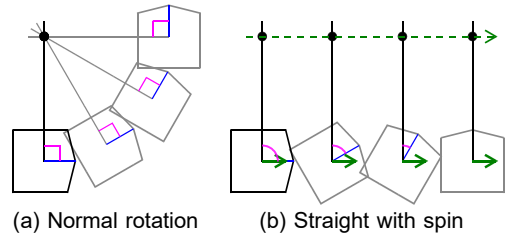


Fig.7 Curve rotational motion and spin motion.

中心がある。それに対して、スピン直進では、その中心軌道に対して、並進速度と角速度から定まる擬似的な旋回半径だけ離れた線上を並行して旋回中心が移動すると解釈できる。このとき、ロボットから見れば、その旋回角速度と逆回転の角速度で旋回中心がロボットを周回する。

本ロボットのように全方向性があると、ロボットに対して任意の位置に旋回中心を置くことができるため、この旋回中心の周回が実現できる。そこで、スティックのもう1自由度にはこの動作を実装した。この操作がなされた場合、旋回半径 ρ の指定は上記と同様である。ただし、先ほどは旋回中心の方向を $\psi = \pi/2$ と定めたが、これに車体側で積算した累積の姿勢角 θ_s を併せて、 $\psi = \pi/2 - \theta_s$ とする。これにより、車体の方向が変わることに応じて、旋回中心がロボットを中心に回転して、スピン直進が可能になる。ただし、この θ_s を残すと、通常の旋回動作に支障がでるため、このスピン指令は、ゼロではない指令が維持される間は継続し (θ_s の積算を続ける)、指令がゼロに戻った時点で $\theta_s = 0$ にクリアする (通常の旋回となる) とした。

3.3 動作実験

動作実験については、実際にコントローラで操作することで想定通りの挙動が得られるかを試験した。定量性のある評価は行っていないが、付随する動画に示すとおり、全方向への並進、カーブ、斜めに移動しながらのカーブや曲率の連続変化、および上記のスピン直進動作が可能であることを定性的に確認した。

4 おわりに

本稿では、操舵機構に遊星歯車機構を用いた4輪アクティブキャスト式の車輪移動ロボットの実装について述べた。先行研究の手法をもとに、モータを機構に直接搭載できるようにし、ユニットをコンパクトにした。また、上位の動作計画がなくとも、非力な16bit 組込マイコンで実装できる、コントローラ操作型の制御系を実装した。

本研究の当初の目的である建設現場での建材の輸送補助を実現するには、機構の耐久性や積載を可能とするための性能向上が必要となるほか、障害物対応や協調、誘導などの上位層の実装が今後の課題となる。

参考文献

- [1] 中田竜輔, “建材運搬用四輪ステアリングロボットの開発”, 東北学院大学大学院 2023 年度 修士学位論文, 2024
- [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, pp. 379–380, 2005
- [3] 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, pp. 381–381, 2005
- [4] 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, vol. 27–3, pp. 343–349, 2009
- [5] 広瀬茂男, 佐藤幹夫, “多自由度ロボットの干渉駆動”, 日本ロボット学会誌, vol. 7–2, pp. 20–27, 1989
- [6] 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>, 2022, (2024/3 閲覧)
- [7] 中田竜輔, 熊谷正朗, “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”, 計測自動制御学会東北支部研究集会, 346–5, 2023
- [8] 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