

指南車の製作

三重大学工学部工学研究科技術部加工開発グループ

中川 浩希

nakagawa@mach.mie-u.ac.jp

1. はじめに

指南車とは、車がどの方向に進んでも車上に立つ像の指先（または矢）が常に南（一定の方向）を指す車である。史書によれば、伝説の帝王である黄帝が指南車を作り、霧の中の戦でも迷わずに目的地にたどりつき敵を捕らえたと伝えられている。実際に作られたのは魏の時代（220～265）といわれている。その昔、指南車は磁石を利用して南北を指す装置と考えられていたが、磁石ではなく歯車仕掛けによって車上の像が絶えず一定方向を指すように作られた装置である。

図1は、1937年に王振鐸氏により復元された指南車の図面である。この指南車の原理は、車を引く長柄の後端と左右の噛み合い歯車が紐で結ばれており、車を旋回させるときに長柄を傾けることにより、歯車を切替えて像を一定の方位へ示させるようにしていた。その後1947年には、ランチェスターが「黄帝の指南車」と題する講演会で、図2のような差動歯車（傘歯車）機構を用いた指南車を提案している。この形式は、これまでに国内外において復元された指南車の機構に最も多く採用されている。また、平歯車を組み合わせて差動機構を構成した新たな指南車も製作されている。そして差動歯車機構は、近年の自動車のデファレンシャル・ギアなどに広く利用されている。

工学部工学研究科実験・実習工場では、25年ほど前に指南車を製作したが、完成後に依頼者へ引き渡したため、指南車の完成品が残っていなかった。そこで機械設計および機械加工技術の継承と向上を目的として指南車を製作することとした。

本報告では、製作した指南車の設計、部品加工、組立と調整、動作確認について報告する。

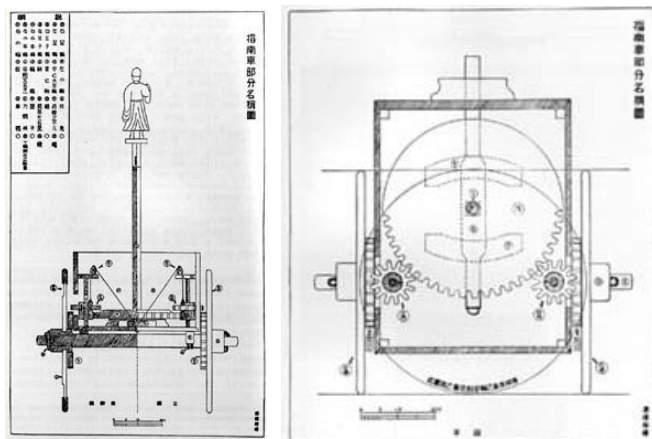


図1 王振鐸氏による指南車の復元図

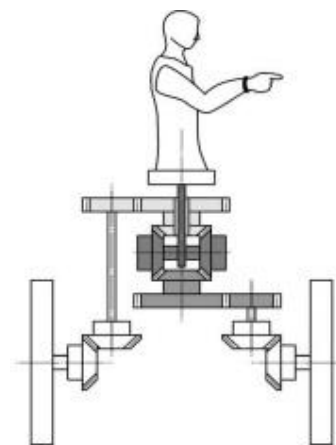


図2 ランチェスター型指南車

2. 指南車の設計

今回製作した指南車は、平歯車を組み合わせて差動歯車機構を構成するもので、左右車輪の回転差を差動歯車機構により検出し、キャリアを通じて方向を指し示す矢に回転力を伝達することで、矢が一定の方向を向く機構を取り入れ、設計を行った。

指南車が角度を知るのは左右車輪の回転差であり、指南車本体が回転した角度分反対に矢を回転させなければならない。それについて以下に示す。

指南車の向きを θ 、左右の車輪の回転角を ω_L 、 ω_R 、指南車の平均回転半径を R 、図3のように車輪の直径を D 、車輪の間隔を L とすると、図3の右図から $(R+L/2)\theta=(D/2)\omega_R$ 、 $(R-L/2)\theta=(D/2)\omega_L$ となる。これらの式から R を消去すると、 $L\theta=(D/2)(\omega_R-\omega_L)$ が得られる。

この式から、

$$\theta = (\omega_R - \omega_L)(D/2L)$$

矢の向きを θa とし、これを次のように指南車の向きに対して逆にすれば、矢が常に一定の方向を向くようになる。

$$\theta a = -\theta = (\omega_L - \omega_R)(D/2L)$$

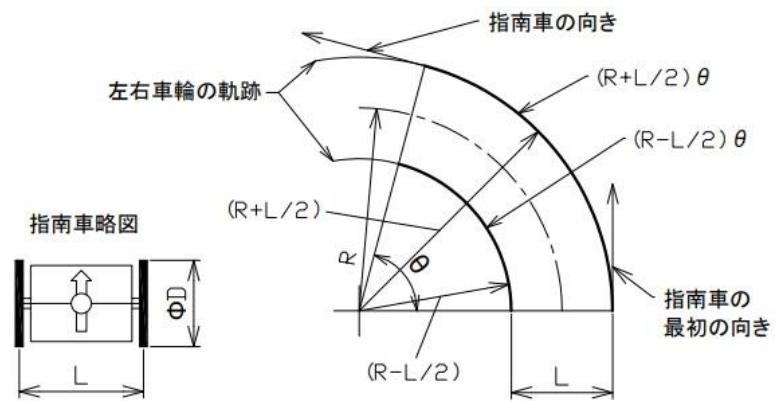


図3 指南車の向き

左右車輪の回転差を検出する差動歯車機構、方向転換機構、逆転機構の3つの歯車機構を図4のように配置した。逆転機構は、4つの平歯車を使用し、隣接する右車輪の回転を逆転し、中心部を通る軸（シャフト）で、差動歯車機構へ伝える。差動歯車機構は、2つの太陽歯車（平歯車）と2つの遊星歯車（平歯車）そしてキャリアで構成している。それぞれの太陽歯車には、逆転機構からの軸と、左車輪からの軸が繋がっており、左右の車輪の回転数に差が生じたときに、遊星歯車が自転しながら太陽歯車の周りを公転し、キャリアを回転させる。キャリアと固定したパイプ状の軸によって方向転換機構に回転を伝える。方向転換機構は差動歯車機構が伝えた回転を傘歯車で車上の矢に伝え、矢を回転させる歯車機構とした。各機構は車台板（フレーム）の下側に取り付ける形にし、各歯車を支える軸（シャフト）の端部には、転がり軸受（ベアリング）を取り付けて滑らかな回転をするようにした。

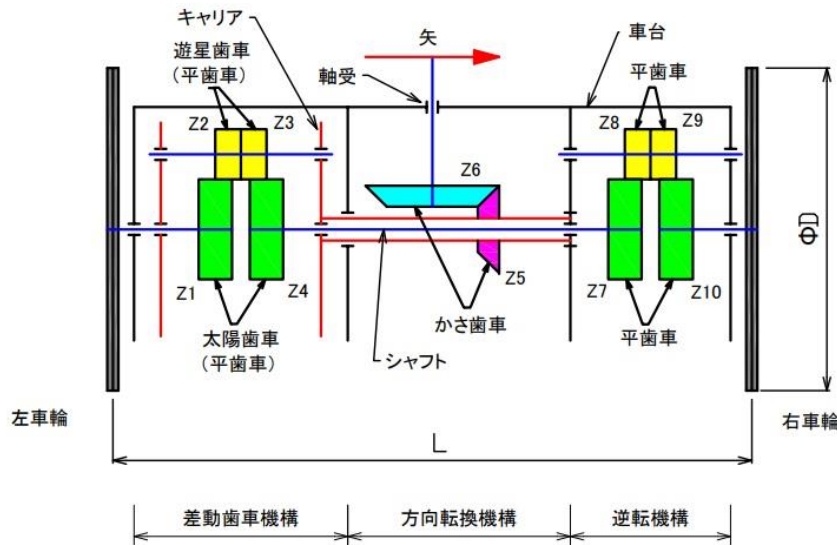


図4 計画図

車輪間隔と車輪直径は、車輪間隔 L 、車輪直径 D と、かさ歯車 $Z5$ 、 $Z6$ の歯数の関係式 $Z5/Z6 = D/L$ を用いて求めた。 $Z5 = 20$ 、 $Z6 = 40$ 、車輪間隔 L は3つの歯車機構とフレームと車輪を無理なく配置し、卓上で走行させることが可能な車体全体の大きさを考えて $L = 290\text{mm}$ として計算し、車輪直径 $D = 145\text{mm}$ を求めた。また、今回使用した平歯車、傘歯車の歯数とモジュールを表1に示す。

表1 歯数とモジュール

歯車	平歯車 $Z1, Z4, Z7, Z10$	平歯車 $Z2, Z3, Z8, Z9$	傘歯車 $Z5$	傘歯車 $Z6$
歯数	30	15	20	40
モジュール	1.5	1.5	1.5	1.5

図4の計画図をもとに、正確な部品加工や組み立てを行うための組立図と部品図を作成した。図5に組立図，図6に組立図の詳細A-A断面を示す。指南車は卓上で走行させることが可能な320mm×280mm×170mmが車体全体の大きさと、フレームは各歯車機構の回転や動きが観察可能な透明アクリル板とした。車輪、軸（シャフト）、差動歯車機構のキャリアは、アルミニウム合金（A2017）の丸棒および板材を使用した。平歯車、傘歯車は、軽量で無潤滑でも使える樹脂（MCナイロン）製を使用した。また、車輪には接地面との滑りを少なくするためにゴム製のOリングを取り付けた。機械要素部品の転がり軸受（ベアリング）、歯車、Oリングは市販のものを使用した。機械要素以外の部品は、それぞれの部品図を作成し、機械加工により自ら製作した。

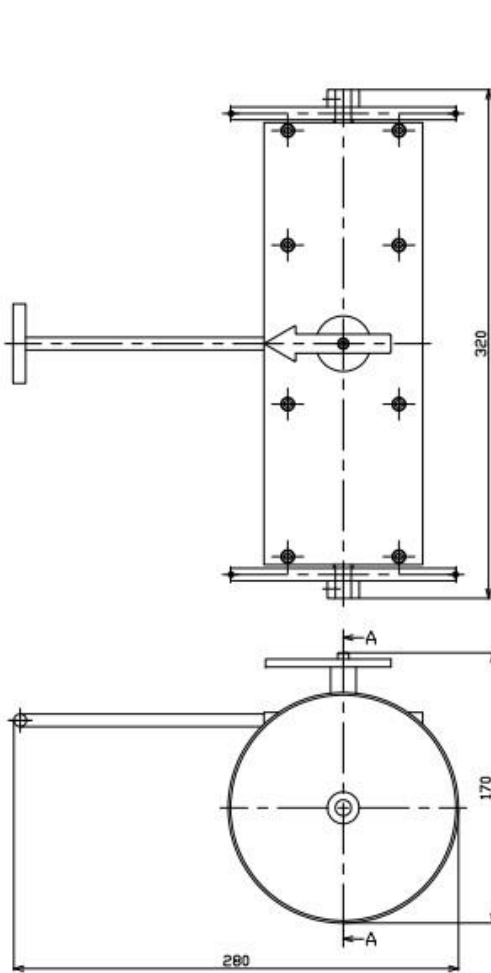


図5 組立図

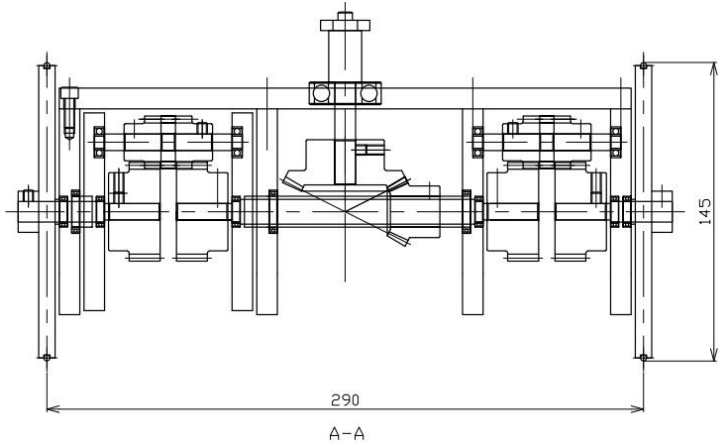


図6 組立図 A-A 断面

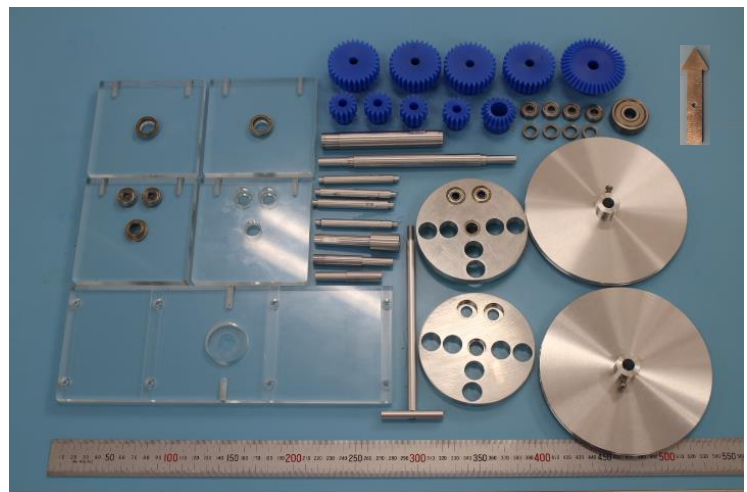


図7 全部品

3. 部品加工

機械加工により製作した部品は21個で、実験・実習工場の汎用旋盤、NCフライス盤、ワイヤ放電加工機を使用して製作した。図7に全部品を示す。

車輪、軸（シャフト）、キャリアは、汎用旋盤とNCフライス盤で製作した。軸（シャフト）は、転がり軸受（ベアリング）をはめ合わせる部分があり、常用するはめあいの軸の寸法許容差（寸法公差）h7の精度で加工を行った。キャリアの加工は、旋盤で円板状に加工後、NCフライス盤で転がり軸受取り付け用の穴加工（寸法公差H7）と、軽量化の穴あけ加工を行ったが、軽量化の穴あけは、穴位置が良くなく回転バランスが悪くなった。指南車の動作には大きな影響はないと考えているが今後改良したほうが良い。フレームは、アクリル板（厚み10mm）で製作した。NCフライス盤で外形加工と、穴位置と穴径の加工精度が必要な転がり軸受取り付け穴（寸法公差H7）を加工した。また、車上に取り付ける矢は、アルミニウム合金（A2017）厚み5mmの板からワイヤ放電加工機で製作した。

4. 組立と調整

機械加工により製作した各部品と機械要素部品を組立てた後、各部の調整を行い完成した。完成した指南車を図8に示す。図9は指南車の主要部である差動歯車機構を示す。今回は、指南車のフレームを透明アクリル板で製作したことにより、どの角度からも歯車機構の動きを観察できるものとなった。

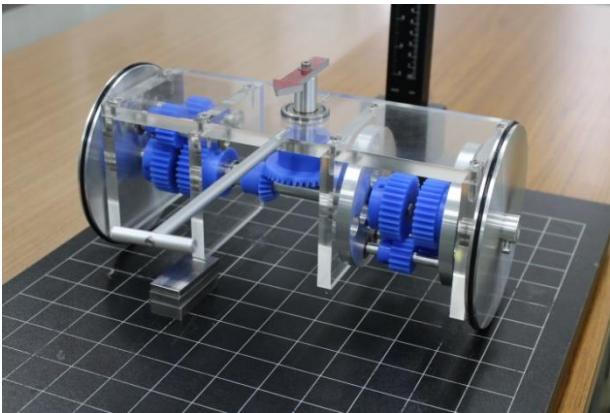


図8 完成した指南車

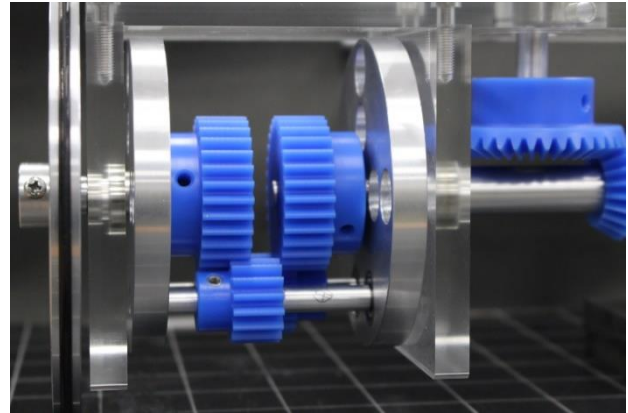
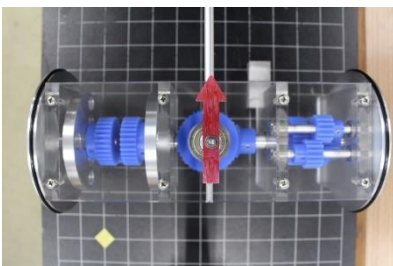


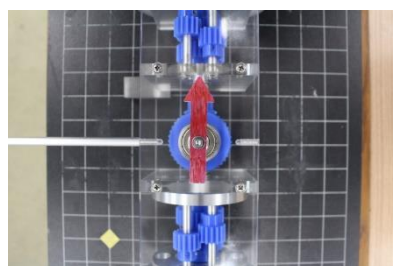
図9 差動歯車機構

5. 動作確認

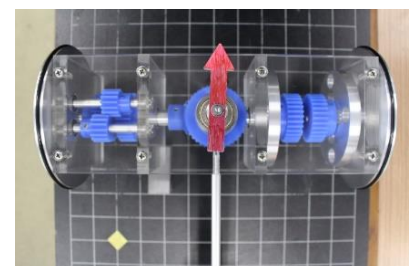
指南車の完成後、卓上で走行テストをして動作確認を行った。車輪や各歯車機構の動きはスムーズで、前後や旋回の走行をしても動作に異常はなかった。図10は、指南車を走行させ、真上から撮影したもので、指南車の向きを0°、90°、180°と変化させたときの様子を示す。車上の矢は、どの角度の時も一定方向を指し示していることが確認できた。しかし、車体の向きを変化させていくと僅かであるが、矢が指し示す方向に誤差(180°で3°程度(目視))があることを確認した。



指南車の向き 0°



指南車の向き 90°



指南車の向き 180°

図10 指南車の動作確認

6. おわりに

今回は、平歯車の組み合わせで差動歯車機構を構成し、指南車の製作を行った。完成後の走行テストでは、各部のスムーズな動きと矢が一定方向を指し示すことが確認でき、指南車の製作は、ひとまず成功し、製作の目的である機械設計および機械加工技術の継承と向上は達成できたと考えている。しかし、矢の指し示す誤差が3°程度(180°)あるため、今後、回転バランスの不良箇所の改善とともに改良をしていきたい。最後に、完成品は工学部工学研究科の実験・実習工場で展示している。

参考文献

- 1) 塚田忠夫 機械設計・製図の実際 減速歯車装置・指南車・ロボットアーム 数理工学社 2007
- 2) 武雄 靖 指南車の設計と製作 千葉職業能力開発短期大学校紀要 第15号 2010.10
- 3) 山崎次男・川田良暁・石野裕二・山田幸男・塚崎重多朗 指南車の製作 遊星歯車方式による試作 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2004
- 4) 指南車 Wikipedia <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8C%87%E5%8D%97%E8%BB%8A>
- 5) 石田正治 指南車 https://www.tcp-ip.or.jp/~ishida96/karakuri/shinansha_jp.html