

指南車の機構と設計結果について (改)

2021年8月5日

日本メカニズムアーツ研究会

佐々木三郎

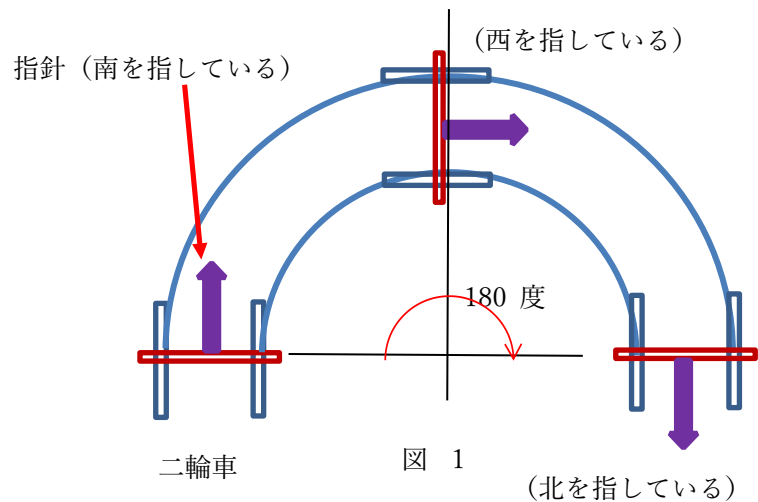
榎本さんより依頼のあった指南車についての調査と設計結果を報告します。

(1) 指南車とは (日本大百科事典 (ニッポニカ) より)

古代中国でつくられた方向を指し示す車。その発明については、中国の伝説上の人物である黄帝が蚩尤(しゅう)を攻めた際、彼の軍隊が霧の中で方向を見失ったが、黄帝が指南車をつくらせて方角を知り蚩尤を滅ぼした、と伝える。左右2輪の車の上に、その両輪に連動するようにつくられた数個の歯車を入れた箱がのせられ、さらに歯車箱に連結する垂直な軸上に木製の人形が置かれた。最初、人形に南をささせておくと、以降は車の進行方向が変わっても、歯車の仕掛けによって人形はつねに南をさし続けるようになっており、磁石などは利用していない。指南車が南をさして人を導いたことから、指南の語は、手引き・案内の意となり、さらに芸芸を指導・教授する人を指南番・指南役などというようになった。[内田 謙]



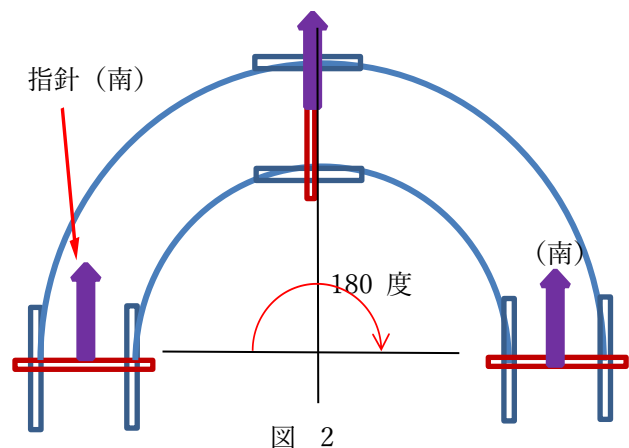
左図は三才圖會に描かれた指南車で高さは1尺4寸2分(約43cm)とあります。



(2) 動きについて

図1の様に仕掛けのない指針が載った二輪車が図のように回転して180度回転した時、指針は180度反対を向いてしまいます。

図2の様に仕掛けのある指針が載った二輪車が図のように回転して180度回転しても指針の向きは常に最初と同じ方向を向くというのが指南車の動きになります。



(3) からくりについて

からくりに必要な動きは右の車輪と左の車輪の回転量が違うことを利用したものとなっています。

今、図3で左右の車輪の車間距離をSとし、右の車輪の回転半径をRとした時、左の車輪の回転半径はR+Sになります。180度回転(半円)した時の右の車輪の移動量をL1、左の車輪の移動量をL2とした時の移動量の差Hは

$$H = L2 - L1$$

ここで図4の円の円周の公式より、それぞれ半円なので

$$L1 = 2\pi R \div 2 = \pi R$$

$$L2 = 2\pi (R + S) \div 2 = \pi (R + S)$$

従って差Hは

$$H = \pi (R + S) - \pi R = \pi S$$

となります。

図5は右の車輪が回転せずに、これを中心に左の車輪だけが180度回転した時の図です。回転半径は車間距離のSとなりますので移動量L3は

$$L3 = 2\pi S \div 2 = \pi S$$

となり、二輪車が大きく回っても、左だけで回っても180度回転する時の左右の車輪の移動量の差は同じ πS となります。

今、車輪の直径をDとした時の円周長さAは

$$A = \pi D$$

となり、これをL3と同じにすると左の車輪が丁度1回転することになります。

$$L3 = A \quad \text{つまり} \quad \pi S = \pi D \Rightarrow D = S \quad \text{となります。}$$

つまり、車輪の直径Dを車間距離Sと同じにすると、二輪車の180度回転で左の車輪の回転が右の車輪の回転より丁度1回転多く回ることになります。

また、この時指針は180度(1/2回転)回転する必要があります。

従って指南車に必要なからくりは、片側の車輪が1回転すると指針が1/2回転する機構があればよいこととなります。

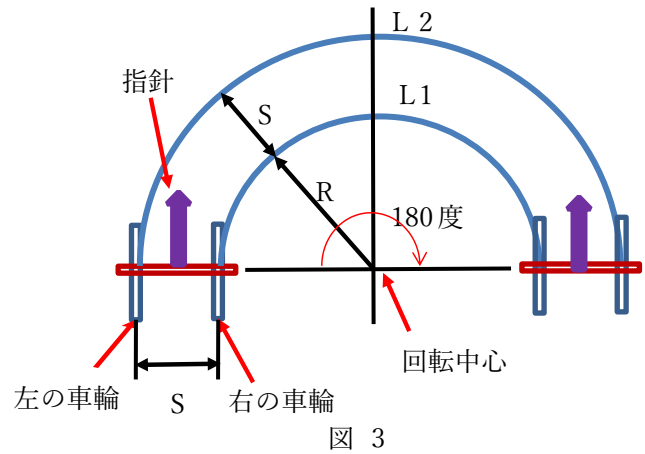


図3

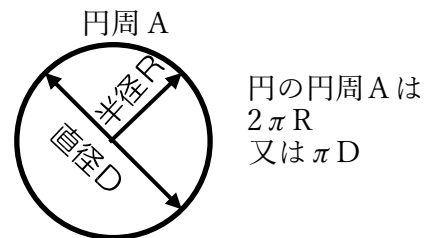


図4

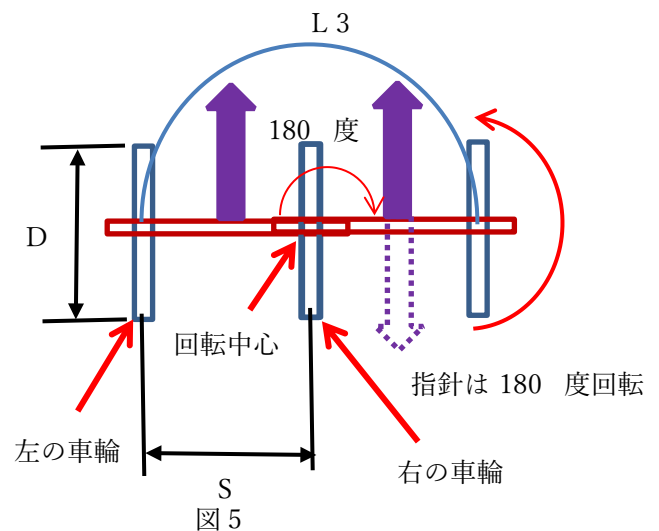


図5

(4) 差動歯車機構

写真1はかさ歯車です。この歯車を図6のように回転軸から出た支柱に中のかさ歯車を取り付け軸の上下から同じ歯数のかさ歯車を中のかさ歯車に噛ませます。これを差動歯車機構と言います。

今上のかさ歯車と下のかさ歯車をそれぞれ反対方向に同じ速度で回転させると中のかさ歯車は回転しますが、支柱のついた回転軸は回転しません。

写真1

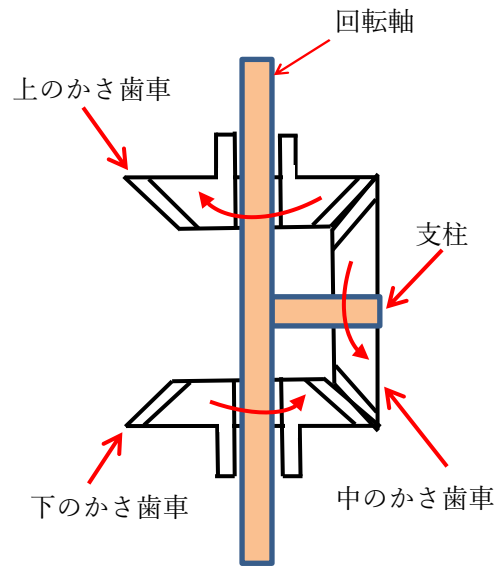


図 6

図7は下のかさ歯車を固定して上の歯車だけを回転させた時の図で、この時中のかさ歯車は回転しながら上下のかさ歯車の回りを回ります。つまり回転軸が回転します。

上のかさ歯車が1回転した時支柱の付いた回転軸は1/2回転します。これを指南車に応用します。

(5) 指南車の機構例について

図8は指南車の機構例で、左の車輪にはかさ歯車を使って方向変換して上の平歯車に伝達して上のかさ歯車を回転させます。

右の車輪もかさ歯車を使って方向変換して下の平歯車に伝達して下のかさ歯車を上と反対方向に回転させます。

支柱のついた回転軸には指針を付けます。

これで左右の車輪の回転数の差を使った指南車が出来ます。

この方式は1947年イギリスのランチェスターが講演会で、差動歯車(かさ歯車)機構の指南車を提案しているのでランチェスター型と言われています。

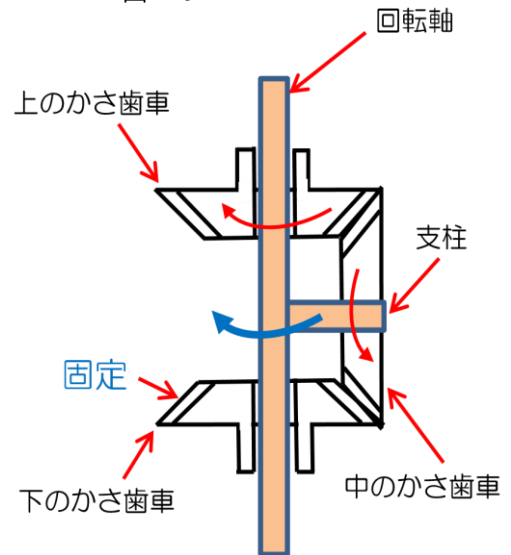


図 7

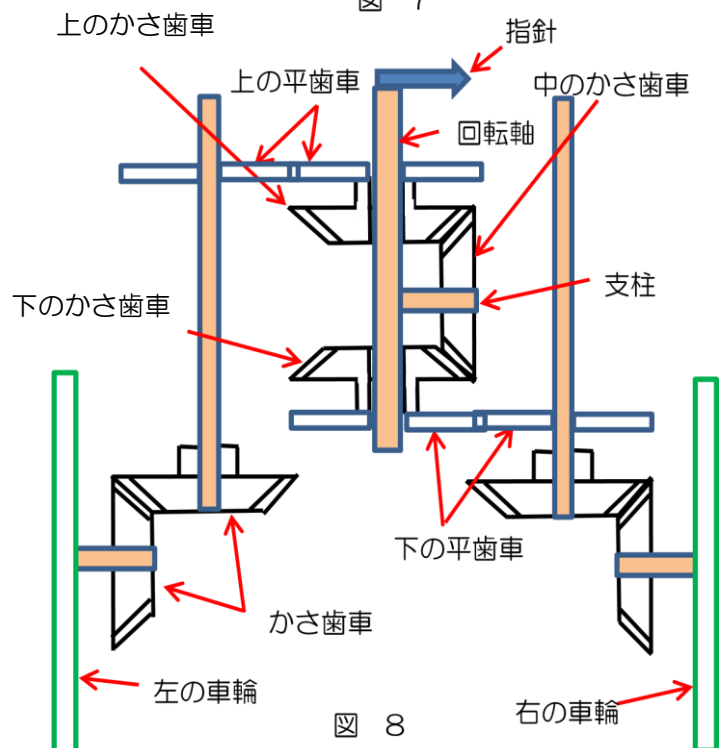


図 8

(6) いろいろな指南車の機構

写真2は平歯車のみを組み合わせた指南車
(はらっく工房)



写真2



写真3

写真3はピン歯車のみを組み合わせた指南車



写真4

写真4はプーリーによる方向変換と伝達を行い
ピン歯車と平歯車による差動歯車機構の指南車

図9はプーリーと摩擦車を組み合わせた指南車で
テンション調整機構付き

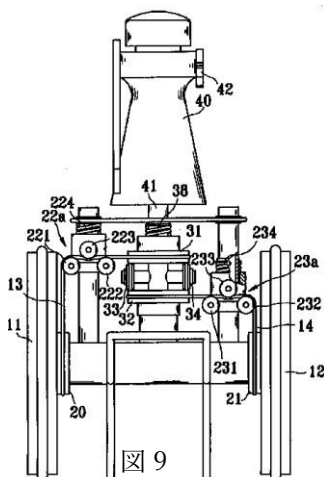


図9

図10は摩擦車と平歯車を組み合わせた指南車

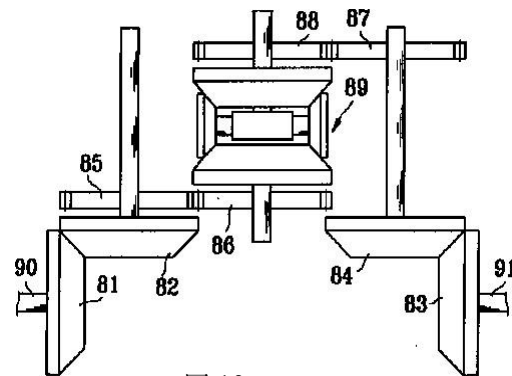


図10

図 11 は差動歯車機構を使った指南車

図 11

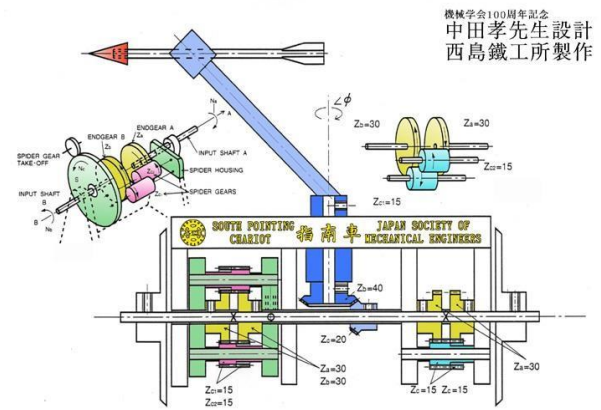
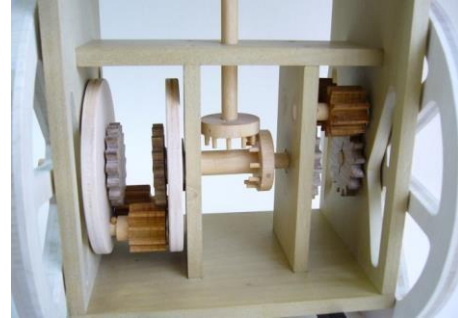


写真 5 は図 11 と同じ差動歯車機構
(中田式) を使った指南車
(はらっく工房)

写真 5



(7) 指南車の設計

榎本さんより依頼があり、協育歯車を使って、一般的なランチェスター型の指南車を設計しました。図 12 に基本レイアウトを示します

同じかさ歯車 ($m=0.8$ $Z=30$) が 7 個、同じ平歯車 ($m=0.8$ $Z=40$) が 4 個で構成されています。

車間距離 S は 151mm で車輪の直径 D は同じく 151mm となっています。

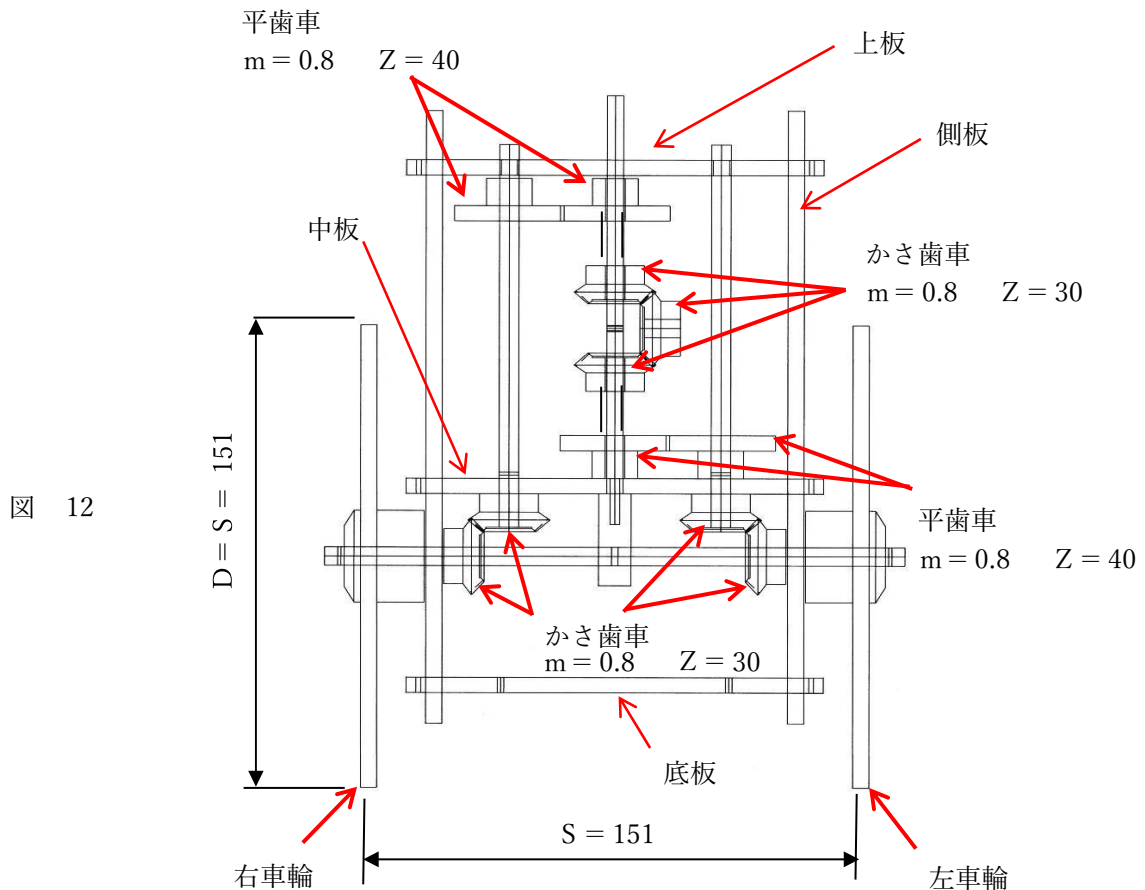


図 12

図 13 はアイソメ図で、高さは本に書かれている 1 尺 4 寸 2 分 (43 c m) 程度を目指しました。

図 14 は上面図で、巾は 178mm で前後は 351mm です。

図 15 は正面図で、図 16 は側面図で人形の高さを 154 mm とした時の高さは 410mm となりますが、人形の大きさに変わってきます。

ちなみににはらっく工房の作品は写真 6 が高さ 450×巾 240×前後 480mm で写真 7 は高さ 400×巾 180×前後 350mm です。

人形の台及びケースは写真 8 の指南車を参考にしました。



写真 6



写真 7



写真 8

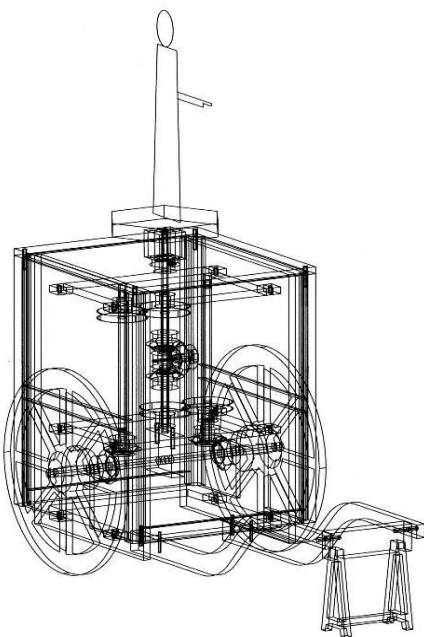


図 13 アイソメ図

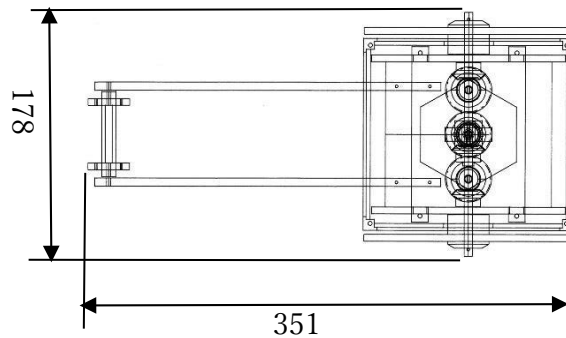


図 14 上面図

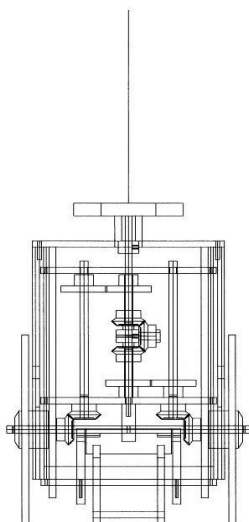


図 15 正面図

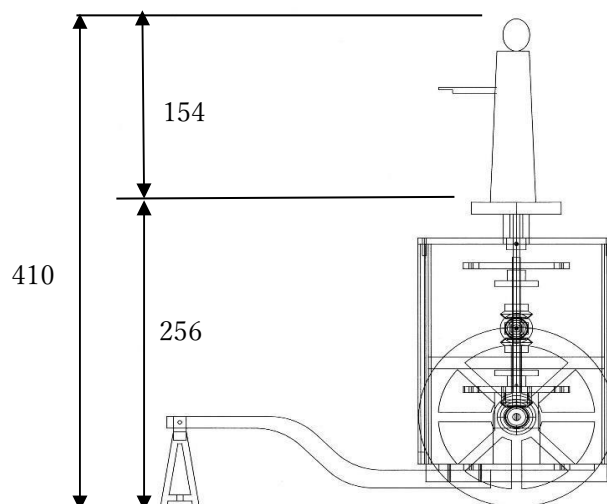


図 16 側面図

(以降は今回の追加項目)

(8) 差動歯車の減速比 V について

図 17 は差動歯車の中歯車を側面から見た図で、図 18 は中歯車を正面から見た図です。図 18 で下歯車を止めて上歯車を \rightarrow の方に回転させたとき、中歯車の中心は上歯車の移動量の半分しか動きません。上下歯車、中歯車の歯数（直径）に関係なくこの関係は成り立ちます。以上から差動歯車は
上歯車や下歯車の 1 回転に対して

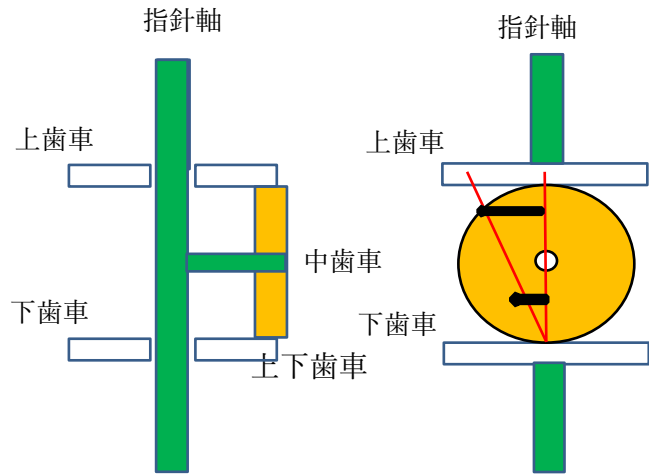


図 17 中歯車側面図

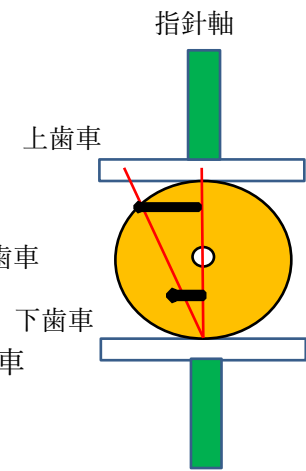


図 18 中歯車正面

指針軸の回転は $1/2$ 回転する 従って減速比 V は 2 倍になります。

(9) 指南車の車輪の直径 D と車間距離 S と減速比 V の関係

図 5 の説明をおさらいすると、今右の車輪を固定して左の車輪のみ回転させて車を 180 度回転させると前向きの指針は何もしないと下向きになってしまいます。指南車にするためには指針を 180 度反対方向に回転させる必要があります。

車輪の直径 D 、車間距離 S とすると車が 180 度回転したときの車輪の軌道 L は車間距離 S を半径とした半円になりますから車輪の軌道 L は

$$\text{車輪の軌道 } L = (2\pi S) \div 2 = \pi S \quad \dots \textcircled{1}$$

となります。 円周

車輪の軌道 L を移動するのに車輪が何回転するかは車輪の円周長さで車輪の軌道 L を割ると求められます。車輪の回転数 N は

$$\text{車輪の回転数 } N = \text{車輪軌道 } L \div \text{車輪の円周} (\pi D) \quad \dots \textcircled{2}$$

②の L の代わりに①の πS を入れると

$$\text{車輪の回転数 } N = \pi S \div \pi D = \frac{\text{車間距離 } S}{\text{車輪直径 } D} \quad \dots \textcircled{3}$$

この車輪が N 回転すると指針は $1/2$ 回転することになりますから、指針軸を 1 回転させるためには $2N$ 回転必要になります。これを減速比 V で表すと

$$\text{減速比 } V = 2N \quad \dots \textcircled{4}$$

④の N の代わりに③を代入すると

$$\text{減速比 } V = 2 \cdot \frac{\text{車間距離 } S}{\text{車輪直径 } D} \quad \dots \textcircled{4}$$

指南車の法則

$$V = 2 \cdot \frac{S}{D}$$

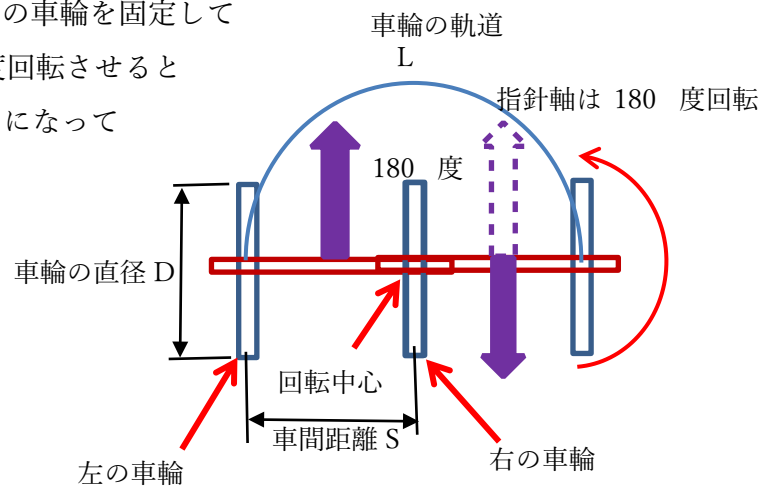


図 5

のような関係になります。つまり指南車に必要な減速比 V 、車間距離 S 、車輪の直径 D はどれか2つが決まると他は自動的に決まります。

(10) 実例について

車間距離 S と車輪の直径 D の比から減速比 V を見てみると

例① $S/D=1$ の時は $V=2$

例② $S/D=2$ の時は $V=4$

例③ $S/D=3$ の時は $V=6$

となります。

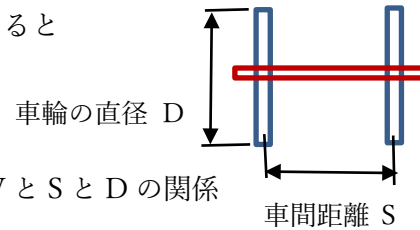


図 19 V と S と D の関係

例①として図 20 の本設計のモデルが該当します。

車間 S と車輪の直径 D は同じで、差動歯車を使って減速比 V は 2 倍となっています。歯車は平歯車と傘歯車の 2 種類で、歯車の数は 11 です。歯車の歯数は 30、40 の 2 種類でシンプルな構成になっています。この構成だと指南車の上の人形の向きは前向きになります

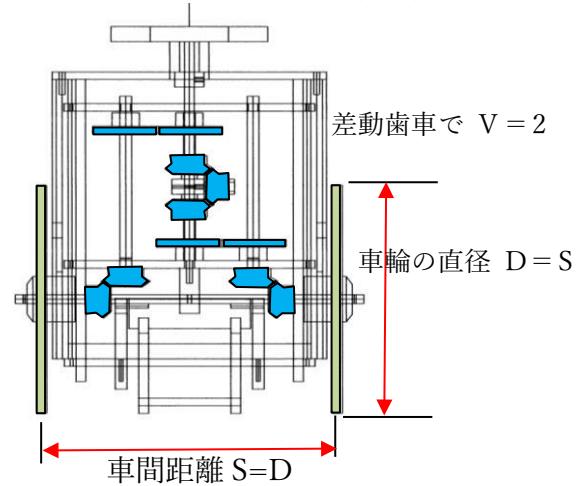


図 20 本設計モデル

写真 9 ははらっく工房モデルで写真 10 の東工大中田先生モデルを

参考にしたもので、車間距離 S と車輪の直径 D は同じです。減速比 V は差動歯車を使って 2 倍となっています。歯車は平歯車とピン歯車の 2 種類で、歯車の数は 10 となっています。歯数は推測で 10、18 の 2 種類で、シンプルな構成です。人形は前向きです。

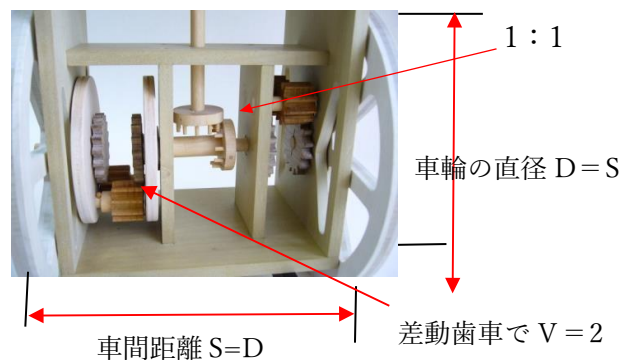


写真 9 はらっく工房モデル

例②として写真 10 の東工大中田先生モデルがあり
車間距離 S は車輪の直径 D の 2 倍 (図面を測定) あり
ますので減速比 V は差動歯車で 2 倍と

他の所での減速 2 倍を合わせて減速比
 V は 4 倍となっています。

歯車は平歯車と傘歯車の 2 種類で

歯車の数は 10 となっています。

歯車の歯数は 15、20、30、40

の 4 種類となっています。

シンプルですがやや歯数の種類の

多い構成になっています。指針は

前向きになっています。

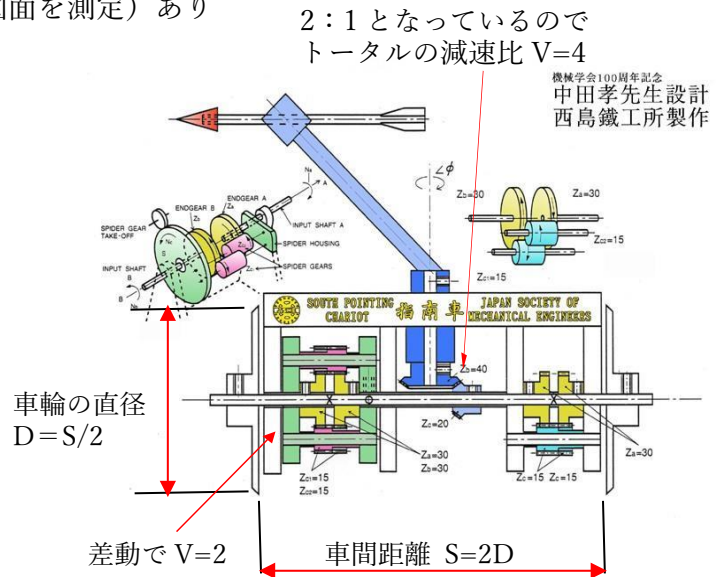


写真 10 中田先生モデル

例③として写真 11 の埼玉大学の遊星歯車方式の
モデルがあり、車間距離 S は車輪の直径 D の 3 倍
あります。遊星歯車機構を使って減速比 V は 6 倍
となっています。歯車の種類は平歯車、傘歯車、

遊星歯車の 3 種類で、歯車の数は 12 ですが、

人形の回転方向が合わない為、

後ろ向きになっています。

車輪の直径 $D=S/3$

前向きに変換するためには歯車が

2 枚必要になりますので合計は 14 となります。

歯車の歯数は 20, 30, 40, 100, 150 と

5 種類あり、複雑で高精度を必要とする構成になっています。

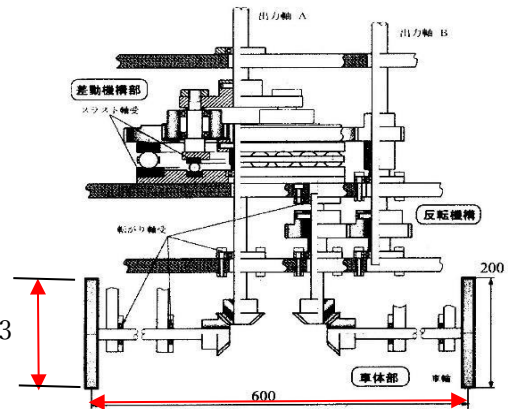


写真 11 埼玉大学モデルの遊星歯車機

写真 12 は完成写真ですが、全体のケースに対して
中の機構部は小さく幅方向に余裕がありますが、
先述した指南車の法則により車輪の直径 D を 200
mm としたため車間距離 S は 3 倍の 600mm にせ
ざるを得ません。車間距離 S を 400mm にすると、
減速比 V は 4 倍になりますので、わざわざ遊星歯
車機構を使う必要がなくなります。

高さ方向も大分余裕があり、わざわざ薄型が可能
な遊星歯車を使う必要がないように思います。

人形も後ろ向きで一般的な指南車の前向きのもの
とは違ったものとなっています。



写真 12 埼玉大学モデルの完成写真

そもそも 4000 年前に発明された（埼玉大の論文より）指南車を現在の最新技術の遊星歯車機構を採用して復元する意味がよくわかりません。単に遊星歯車機構ありきで作ってみたものと思います。遊星歯車の利点を生かして、もしも減速比 V を 10 倍にしたら、車輪直径 200mm だと車間距離は 1000mm になってバランスの悪いものになってしまいますので、減速比 V を 6 倍に抑えて設計製作したのではないかと思われま

以上、いずれも指南車の法則 $V=2 \cdot S/D$ に合致したものとなっている事が判りました。従って、この法則にのっとりて指南車の大きさ、形状、減速比を好みに合わせて設計することが可能です。