An idea of small-light weight joint actuator for lower limb brace

○ 山本耕之 正(久留米工大), 元田英一 正, 鈴木康雄 正(労リハ工センター)

Kouji Yamamoto, Kurume Institute of Technology, 2228 Kamitsu Kurume, Fukuoka830-0052, Japan

Eiichi Genda, Yasuo Suzuki, Rousai Rehabilitation Engineering Center, 1-10-5 Komei-cho Minato-ku Nagoya 455-0018 Japan

Key Words: lower limb brace, joint articulator, high-ratio reduction, sandwich style planetary gear layers

1 緒言

不完全脊髄損傷対麻痺患者が免荷量を軽減しながらトレッドミル上の長期歩行訓練で、歩行能力を回復する例を見る。またこの訓練の前にストレッチ運動を行うと訓練の効果が上がることが分かっている。ストレッチと歩行を補助するためのロボットやパワースーツは未だ高価な上、重装備であるので、多数を準備し患者全てが同時に使うことができず、結局は社会復帰の障害となっている。ここに小径の薄型軽量な自立駆動関節を持つ安価な下肢装具があれば、訓練を受ける人々にもセラピストにも朗報となる。

対応する構成歯車の歯数差が僅差の1となる2種類の遊星歯車装置をサンドウィッチ構造にして非常に大きな減速比の関節装置を、小型モーターで駆動し、下肢関節モーメントと歩行速度に十分耐える薄型の関節減速駆動装置を案出した。その原理とこれを関節ユニットとして組み込んだ下肢装具を提案する。

2 減速機構の原理

Fig.1 Stepped gear rotation's slow rack conveying

図1には減速原理を示した。大小各々 a, b 2段の段付き歯車の各段と噛み合う2つのラックA, Bを上下平行に配置し。固定ラックA上で段付き歯車が回転すると、ラックBは v_R の速度で移動する。この時 a 歯車上死点Pの速度 v_a との比はO点を瞬間中心として、2つの歯車 a, b のモジュールを等しく、ピッチ円直径は d_a, d_b 。歯数を z_a, z_b とし、歯数 $z_a - z_b$ の差を最小値1とすると減速比は最大となる。

$$v_R/v_a = \overline{OR}/\overline{OP} \dots \dots \dots (1)$$

$$v_R = \left(\frac{d_a - d_b}{2d_a} \right) v_a = \left(\frac{z_a - z_b}{2z_a} \right) v_a = \left(\frac{1}{2z_a} \right) v_a \dots \dots (2)$$

3 薄型の関節減速駆動機構

2個のラックをリング状にして大小2個の同心の内歯車A, Bに置き換えると無限軌道タイプの減速機構を実現できる。これをA, B, Aとサンドウィッチ状に重ね関節を形成する装置の概念を図2に示した。

Fig. 2 Conceptual mechanism of joint reduction unit

ヨークと一体の外層Aは大径2個の完全遊星歯車列で歯数 z_s の太陽歯車sを持ち、キャリア（アーム）cで等角度にリング内に3個配置した段付遊星歯車の大径側と噛み合う。この2層がクランクと一体の太陽歯車を持たない不完全遊星歯車列を挟むサンドイッチをなす。段付き歯車とラックの減速と遊星歯車の減速を相乗して高減速比を得る。減速装置そのものが関節となる。段付き歯車歯数差が1のとき、リング状内歯車の歯数を z_A, z_B として歯数差は

$$z_A = z_s + 2z_a, \quad z_B = z_s + 1 + 2z_b$$

$$z_A - z_B = -1 + 2(z_a - z_b) = 1, \quad z_a - z_b = 1 \dots \dots (3)$$

Table 1 Gear tooth numbers and reduction ratios calculation

Parts	s: sun gear motor shaft	a: planet gear in one block as a stepped gear	b: planet gear	B: minor internal ring gear	A: major internal ring gear	c: Carrier (Arm)
Tooth number	$z_s=18$	$z_a=45$	$z_b=44$	$z_B=107$	$z_A=108$	
motion	revolution	N_s	N_b	N_B	N_A	N_c
I carrier fixed, sun gear rotates clockwise 1 turn	1	$-N_s z_s / z_a = -2/5$	$-N_s z_s / z_a = -2/5$	$-N_s (z_s / z_a) (z_b / z_B) = -(2/5)(44/107)$	$= -N_s z_s / z_A = -18/108$	0
II whole rotates clockwise 1 turn	1	1	1	1	1	1
III carrier fixed, A gear rotates anti-clockwise 1 turn	$108/18 = 6$	$-108/45 = -12/5$	$-108/45 = -12/5$	$-(108/45)(44/107) = -4752/4815$	-1	0
IV Total of II+III	$1+6=7$	$1-12/5 = -7/5$	$1-12/5 = -7/5$	$1-4752/4815$	0	1
final reduction ratio	input: 1	-1/5	-1/5	output: 1/535	0	1/7

表 1 には機構学の教えるところによって、各歯車の歯数と各条件回転に対する各歯車の回転数とさらにモーター軸と関節回転との終減速比を算出した。

4 減速装置設計

4-1 歯車の寸法と強度

この関節駆動の大きさの制約は、モジュールをスリムで薄型とすることから決まる。モーターの突出分も考慮して、実際の外径はおおよそ 100[mm]以内、従って、内歯車のピッチ円の直径は歯底の肉厚を考慮して 50[mm]から 60[mm]とする必要がある。また厚さは 30[mm]以内に納めなければならない。従って 1 層の遊星歯車の歯幅は 5[mm]以内に納めなければならない。

強度については下肢関節の中最大の歩行中の足関節モーメントに耐えることである。これを おおよそ $M_a=70000$ [Nmm] としてこれに耐えるように設計する必要がある。最大のリング状内歯車のピッチ円周上の接線力を P [N], 直径ピッチ(module) m [mm]を Lewis の式を変形して求めると、

$$P = \sigma_b \pi m w y$$

$$m = \sqrt[3]{\frac{2M_a}{z_A \sigma_b \pi k y}} \quad \therefore m = 0.47 \approx 0.5 \dots (4)$$

ここで、 $z_A = 108$, $\sigma_b = 300$ [Mpa]: 歯車材; 機械構造用炭素鋼(0.45C%)の許容繰返し曲げ応力, w [mm]: 歯幅, $k = w/m \times 3 = 10 \times 3 = 30$ (遊星歯車の内噛み合い点は 3 点): 歯幅係数, そして $y = 0.455$: 歯形係数とする。

4-2 不完全遊星歯車の噛み合い位相の合わせ方

Fig. 3 Planetary stepped gear blocks' tooth phase meshing

サンドウィッチは外側 2 層の完全遊星歯車列で不完全遊星歯車の 1 層を挟み込む 3 層の構造である。等分に配置した 3 個の遊星歯車ブロックは 3 段の段付き歯車となっている。完全遊星歯車機構では噛み合い拘束条件を満足する。しかし不完全遊星歯車の遊星歯車とその内歯車歯の位相は配置される位置に従ってずれる。組立てにはこの点に注意を要す。

図 3 にこの解決法を多角形のモデルを用いて示した。遊星歯車を 3 層のブロックにするととき一つの歯の向きが一致するように組み立て、3 個ともこの一致点を同じ向きにして平行移動し、各位置に配置すればよい。リング歯車とブロック遊星歯車各々では一周当たり 1 歯分のずれであるから一周の 1/3 の位置では 1 歯の 1/3 のずれとなって各位置でのずれ量は一致し、噛み合いの位相は合致する。

4-3 他の関節駆動減速機構との比較

図 4 に示す 2 つの減速方式の比較に示すように、左のハーモニックドライブは楕円回転子でカップ口縁の歯車を楕円に撓ませてリング状内歯車の 2 箇所接触するため 1 回転当たり 2 歯分進むが、右は 1 歯のみ進むので減速比は 2 倍大きくとれる。しかもカップの深さのためのスペースを取る必要がなく、さらに内接点は 2 ないし 3 箇所以上を取ることができ歯幅を稼ぐことができるため薄型を追求できる。また特殊カップ型歯車や、他の機構に見る転移歯車を使用せず、ほぼ標準歯車のみにて構成でき、回転子は両端単純支持なのでスラストや片持荷重からも解放される。

Fig.4 Comparison with the other reduction mechanism

5 自立関節駆動型下肢装具の構想

Fig.5 Joint moving brace consisting with the joint motion units and its fitting to lower limb

図 5 には本関節減速駆動装置ユニットを、全ての関節に共通に用い、大腿、下腿、足部のバーで連結して下肢装具を構成できることを示した。幼児から成人に至る広範囲の体格に合った装具製作はバーの長さ調節のみで可能となる。

6 結論

小さいモーターで駆動できる小型薄型の関節駆動ユニット用いた自立関節駆動型下肢装具を提案した。将来、駆動モーターの統合制御を付加して、ストレッチからトレッドミル上で歩行訓練を介助代行させることができれば、歩行能力回復訓練を授受する双方の人々に朗報となる。