

三角波を用いた位相同期伝達機構における摩擦係数の影響

Influences of the Coefficient of Friction on a Synchronized Phase Transmission Using Triangular Waves

マレーシア工科大（正）*福田 応夫 インペリアル・カレッジ・ロンドン（非）ヤップ キアンクン

Kanao Fukuda¹⁾, Kiankun Yap²⁾

1) Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia-Japan International Institute of Technology, 2) Imperial College London

1. 緒言

弦楽器のチューニングピンのように、特に半径方向の空間的制約がある中で、回転運動を同軸で減速して伝達する機構に対するニーズが存在する。同軸回転減速機構には、遊星歯車を代表にいくつかの方式が存在する¹⁻²⁾が、いずれも回転半径方向に複数の機械要素を配置する必要がある、またいくつかの方式では円周方向に揺動する機械要素を必要とするなど複雑な機構を用いるため、半径方向の小型化が難しい。筆者らは、減速比に対応する異なる数の波を持つ入力部品と出力部品およびそれらの波の位相を同期させる要素（同期子: Synchronizer）を回転軸方向に配置することにより、半径方向寸法を抑えることが可能な回転減速伝達機構を考案した。考案した機構には、1) 原理的にバックラッシュが発生しない、2) 少ない構成部品数 (Fig. 1) で減速機構を実現できる、3) 波を同期させる位置の選択により出力軸を入力軸と同方向あるいは逆方向の任意の方向に回転させる設計が可能である、4) 出力軸への過負荷を予荷重機構で吸収することができる、5) 半径方向の寸法を小さくできるので構成要素を円環形状に配置することにより内部に大きな空間を確保することもできる、などの特徴がある。半面、考案した伝達機構は波位相の同期機構が必然的にしゅう動を伴うため、高い伝達効率を必要とする用途に応用するには、摩擦によるエネルギー損失の低減が必要である。また摩擦は、同伝達機構を加速機として応用する際に大きな問題となることが予想される。本稿では、考案した機構の最も簡素な構成として、入出力部品に設ける波として三角波を用い、減速比が 4:1 で出力軸が入力軸と同方向に回転する場合において、動摩擦係数が伝達効率に及ぼす影響について考察する。



Fig. 1 Parts used in a synchronized phase transmission for 1:4 reduction

2. 解析モデル

入力波、出力波および同期子の円周上の配置を模式的に直線上配置したモデルを Fig. 2 に示す。減速比が 4:1 で同方向の同期を行う場合、入出力波の位相が一致する位置、つまり同期位置の数は 3 となる。本解析では同期子として複数の球を用いているが、それらはその役割により、入力波から出力波に動力を伝える駆動同期子 (Driving synchronizer)、出力波により押し戻される位相範囲に存在する従動同期子 (Following synchronizer)、そして位相の上下死点位置にある死点同期子 (Dead-point synchronizer) に分類される。入力波と出力波は Fig. 2 において垂直方向予荷重を与えられており、駆動同期子と従動同期子は常に入力波と出力波の双方に押し付けられている。そのため、入力軸の回転方向を反転させた場合は、駆動同期子と従動同期子の役割が瞬時に入れ替わるので、本機構では原理的にバックラッシュが発生しない。Figure 2 の構成では、死点同期子、駆動同期子及び従動同期子の数は、入力波の回転位相により、1:1:1、0:2:1 あるいは 0:1:2 の場合が存在する。ここでは最も簡単な場合として 1:1:1 について解析する。三角波では入出力波と同期子の接触角度は常に一定であり、しかも死点同期子は原理的に垂直方向予荷重を受け持たないので、1:1:1 の場合には Fig. 3 に示したような自由体図を使うことができる。Figure 3 において、同期子は垂直抗力が最大であると考えられる出力波に対して転がり、入力波および同期子ホルダーとは同一の動摩擦係数 μ で滑ると仮定した。解析では微小時間における加減速を無視できるものとして静力学的に行い、入力波、駆動同期子、従動同期子、出力波の 4 つの要素について、水平および垂直方向の力のつり合いと、同期子のモーメントのつり合いを計算した。予備段階の解析で、従動同期子への垂直荷重 N_{1F} , N_{2F} は負の値を示す、つまり荷重を負担して

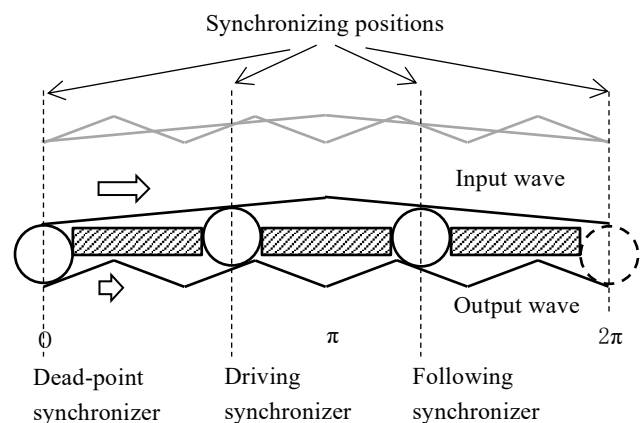


Fig. 2 Schematic drawing of a same direction synchronized phase transmission for 4:1 reduction

いないことが分かったので、ここでは駆動同期子に全ての垂直余荷重と入力が入くと仮定して解析を進めた。解析においては、固定独立可変量として同期子が配置されるピッチ円径を 14mm, 入出力三角波の振幅を 2 mm, 同期子の直径 8 mm, 入力 F_D を 10 N とし、独立可変量として動摩擦係数 μ を 0.001 から 1 まで変化させた。解析結果として得たデータは従属可変量である出力 F_R であり、さらに効率 $F_R / (4 \cdot F_D)$ を求めて考察した。

3. 解析結果と考察

Figure 4 に、今回想定した構成での減速伝達機構の出力 F_R および伝達効率に関する解析結果を示す。出力と伝達効率は同義なので、ここでは伝達効率に限って説明する。動摩擦係数が理想的な流体潤滑状態の場合に相当する 0.001 では、伝達効率は 98.5% に達する。しかしながら、動摩擦係数が 0.001 から 0.01 に上昇するにつれて、伝達効率は緩やかに減少して 85% 程度に低下し、0.01 から 0.1 にかけては急激に減少して 30% 程度となった。また動摩擦係数が 0.2 を超える場合は、Fig. 3 中、同期子のホルダーに対する垂直荷重 N_{3D} が負の値を示したが、これは出力 F_R が入力 F_D 以下の値となることを示しているため、解析を中止した。提案する減速伝達機構において支配的な潤滑機構は、その動作原理から、混合潤滑から境界潤滑の範囲、つまり動摩擦係数で 0.01 から 0.1 程度の値の範囲であると推定されるため、このままの設計では伝達効率は 85 から 30% の範囲に留まることになる。

エネルギー伝達機構においては最低でも 90% 台後半の効率を求められるため、今回想定した構成と設計での減速伝達機構はこの用途には不十分であるといえる。本稿で提案する技術を用いるには、波の振幅など設計パラメータの最適化による効率の向上、同期子の構造変更による根本的な摩擦の低減、超潤滑など最新技術の適用によるしゅう動面における動摩擦係数低減、などの対策を検討する必要がある。次に伝達効率よりも位置決め精度などバックラッシュの少なさが重要である用途については、本減速伝達機構は原理的にバックラッシュが存在しないものの、使用する部品の加工精度や弾性変形が精度に影響を与える可能性があり、今後の調査と検討が必要である。冒頭記した弦楽器のチューニングピンでは、弦のゆるみを防止するために、むしろ摩擦抵抗が大きくブレーキ機能として働くほうが好適である可能性があり、本稿が提案する減速伝達機構の用途としては有望であると考えられる。

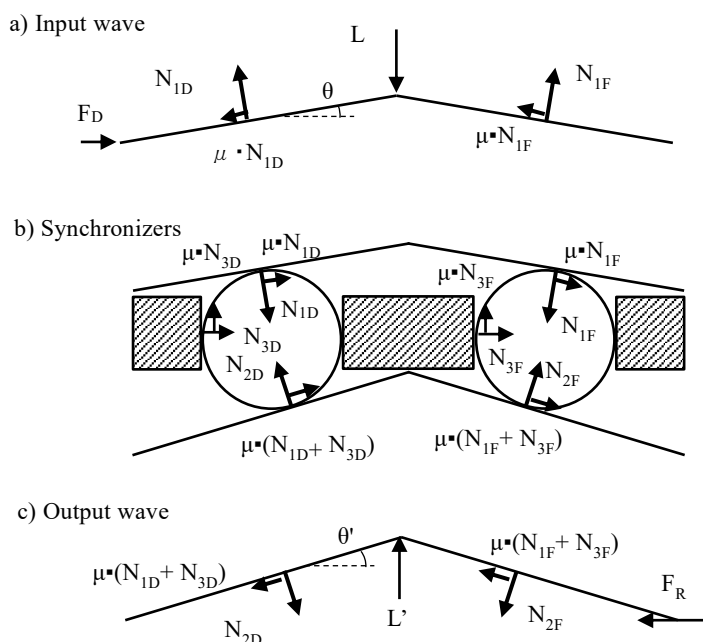


Fig. 3 Free body diagrams for a) input wave, b) synchronizers and c) output wave.

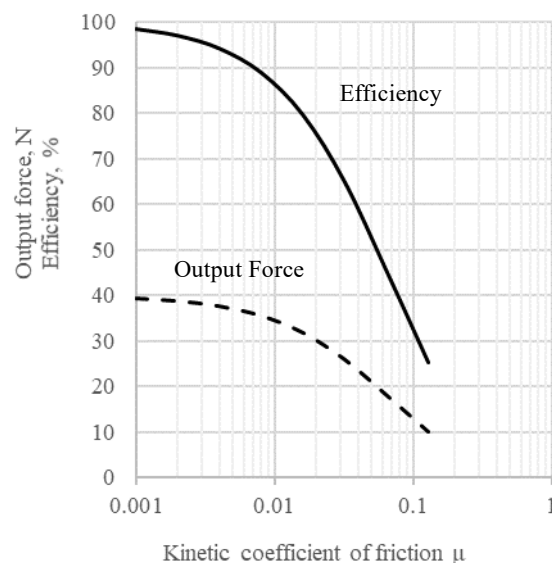


Fig. 4 Calculated output force and efficiency as functions of coefficient of friction.

4. 結言

減速比に応じた異なる数の波を持つ入力部品と出力部品、およびそれらの波の位相を同期させる機構を持つ同軸回転減速伝達機構を提案し、内部部品のしゅう動における動摩擦力が伝達効率に及ぼす影響について検討した。伝達効率は動摩擦係数の影響を大きく受け、特に混合潤滑から境界潤滑領域では急激に減少することが推定された。提案する減速伝達機構を伝達効率が重要な用途に用いるには、設計の最適化、同期機構の構造変更、潤滑方法の改善などが必要である。提案した減速伝達機構では摩擦抵抗がブレーキとして機能するため、弦楽器のチューニングピンなどは好適な適用例であると考えられる。

文献

- 1) 平田 他：ロボット・自動化装置の設計に役立つ精密減速機の最新技術，機械設計，60，4(2016)8.
- 2) 小川：減速機，特開昭 60-168954.