232 ゴム挟持ローラによる紙搬送特性解析

Characteristics of a Paper Feeder Consisting of a Rubber-Layered Roller and a Steel Roller

○中澤 高志 (東京工業大学 大学院), 山浦 弘 (東京工業大学), 小野 京右

Takashi NAKAZAWA, Hiroshi YAMAURA, and Kyosuke ONO,
Tokyo Institute of Technology, Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

This paper describes theoretical and experimental study of steady-state characteristics of a paper feeder consisted of a short rubber-layered roller and a steel roller. It is assumed that the paper thickness and in-plane strain is infinitesimal and ignorable. Deformation and strain of surface of the rubber roller are calculated with our Green's function that has been derived under in-plane stress assumption with Boundary Element Method on cylindrical coordinates. In calculations, loading force between two rollers and paper tension are considered. Velocity ratios of paper feeding velocity to rubber roller velocity are derived from strain of the rubber roller. In order to confirm the numerical results, an experimental setup that consists of an endless paper and a paper feeding mechanism was prepared. Paper feeding velocity and rubber roller were measured experimentally. The experimental results agrees with the numerical ones.

Key Words: Contact Mechanics, Paper, Micro-slip, Friction, Green's function, Experiment

1 結 言

プリンタ, コピー機, 印刷機などでは印刷および紙やフィルムなどの柔軟媒体の搬送の更なる高精度化・高速化が要求されている。これらの装置で使用されているゴム挟持ローラを用いた摩擦駆動による柔軟媒体搬送機構における, 重送, 蛇行, 速度変動, 横すべり現象, 皺などの問題が多数報告されており, 摩擦駆動機構が装置全体の性能を決定するキーテクノロジーとなっている。この問題に対して筆者らは, これまでにゴムローラと媒体, および鋼ローラと媒体の間の摩擦駆動特性を仮定すれば, 軸のスキューが存在する場合の横ずれ速度や, 軸方向の不等分布荷重が存在する場合の回転速度などの媒体の運動を解析的に求められることを示した[1]。しかしここで必要となるゴムローラの摩擦駆動特性, すなわちゴムローラ表面における微視的な接触・スリップ特性(マイクロスリップ), を理論的に求める方法はまだ十分明らかにされていなかった。

筆者らは, ゴム挟持ローラを用いた摩擦駆動による柔軟媒体搬送機構の汎用的かつ効率的解析手法の確立を目的として, 前報においてゴムローラと鋼ローラの摩擦駆動特性を境界要素法に基づいて解析的に明らかにした。すなわち, まず, 鋼芯を有するゴムローラの表面に作用する静的な法線方向および接線方向の単位集中力に対する変形(Green関数)の解析解を導出し, 示した。さらに, 得られたGreen関数を用い, 境界要素法に基づいてゴムローラ・鋼ローラ間の接触・スリップ特性解析を行い, 2つのローラの押し付け力および鋼ローラの負荷力を与えて, 接触面に作用する圧力, ゴムローラ表面のひずみ, 接触領域および回転速度比を数値的に求めるとともに, 鋼芯を有するゴムローラと鋼ローラの回転速度比を測定できる実験装置を製作し, ゴムローラの厚さ, 押し付け力, 負荷力の回転数比に及ぼす影響を測定し, 理論結果との比較を行い, 同理論解析結果の有効性を示した。

本報告では, さらに, 軸方向の押し付け力分布が無視できる短軸のゴム挟持ローラによる紙搬送特性を明

らかにすることを目的とする。すなわち, 前報のゴムローラ・鋼ローラの摩擦駆動解析の結果をベースとして, 2つのローラの押し付け力および紙に作用するテンションを与えて, ゴムローラと鋼ローラによって搬送される紙の速度とゴムローラの回転速度との比を求める理論解析手法を示す。また, ループ状につないだ紙を軸長さ40mmのゴム挟持ローラで搬送する短軸ゴム挟持ローラ紙搬送実験装置を用い, ローラの押し付け力および紙に作用するテンションを変化させて紙搬送速度およびゴムローラ速度を測定し理論解析結果と比較して, 理論解析結果の有効性・限界性を示す。

2 ゴム挟持ローラによる紙搬送特性解析

前報[2]のGreen関数の解析式を用いて, 以下ではゴムローラと鋼ローラの間紙を挟んだ場合のゴムローラと紙との接触解析を用い, 両者の表面速度比に及ぼす押し付け力と紙に作用するテンションの影響を明らかにする。

2.1 解析モデルと仮定 ゴム挟持ローラによる定常紙搬送の解析モデルを図1に示す。下がゴムローラで, 紙を挟んで上が鋼ローラである。前報では, 鋼の部分には変形を無視し剛体と見なし, 紙を挟まない場合のゴムローラと鋼ローラの摩擦駆動特性を明らかにした。本論文では新たに以下の2つの仮定を導入し, 紙搬送特性解析を行った。

- (1) 紙の厚さは無限小で, 紙の面内方向の伸びは無視できる。
- (2) 鋼ローラにはブレーキトルクは作用しない。

これらを踏まえて以下, 解析モデルおよび座標系を説明する。図1において $X-Z$ 座標系は2つのローラが紙の表裏の一点で接触し, まだ変形しないときの接点を原点とした直交座標系であり, $r-\theta$ 座標系はゴムローラの軸中心を原点にとり半径方向外向きを r , 時計回り方向を θ とした極座標系である。それぞれのロー

Fig. 1 Coordinates and forces applied to rubber roller

ラの回転方向は図に示したとおりで、X軸負側が回転入口側、X軸正側は回転出口側である。

本論文では押し付け力 F 、テンション T がゴムローラに作用しているときの接触圧力分布、せん断圧力分布、局所的な固着・すべり領域、ローラ表面の伸びなどを求める。解析モデルでは、ゴムローラは回転のみ許され中心位置を固定されているが、鋼ローラは、押し付け力 F によりZ方向に変位可能で、紙を挟んでゴムローラ面に $\delta_z(>0)$ だけ押し込まれている。一方、ゴムローラ表面には紙に作用するテンション T が負荷力として作用し、負荷力がなければ $x=0$ の位置にあったゴムローラの接触点は、X方向に $\delta_x(<0)$ だけ変位する。そして、固着領域のゴムローラの表面は、押し付け力、負荷力によって伸縮しており、 θ 方向に一定のひずみ ϵ_θ をもつ。このひずみが固着面内で一定である理由は、回転入口端のゴムローラのひずみ状態が紙との固着により固定されたまま固着領域内を回転出口側に移動していくからである。さらに、接触領域を角度で表し $-b \leq \theta \leq a$ として、接触領域幅角を $a+b$ とする。また、鋼ローラに作用するブレーキトルクは存在しないので、紙と鋼ローラの間にすべりは無く、同じ速度で回転している。

2.2 解析結果 紙の運動に影響を与えるゴムローラと紙の速度比について説明する。まず、解析モデルと前報で導出したGreen関数を用いると、ゴムローラ表面に作用する法線方向圧力、接線方向圧力などとともに、ゴムローラが紙に固着している部分の表面ひずみが計算される。この部分におけるゴムローラと紙の表面速度は、固着しているため同じであることから、 V_p を紙の表面速度、 V_r はゴムローラの見接触領域での表面速度、 V_r' はゴムローラの固着部分での表面速度とすると、2ローラの接触部分以外の表面速度比は、 $V_p/V_r = V_r'/V_r$ で表される。この V_r'/V_r は、単位時間を通してゴムの長さの比で表すことができ、ローラ表面のひずみで長さが変化しているの

$$\frac{V_p}{V_r} = \frac{V_r'}{V_r} = \frac{1 + \epsilon_\theta}{1} = 1 + \epsilon_\theta \quad (1)$$

となる。

図2に理論解析により得られた速度比の代表例を示す。ここではゴムローラの外半径 $R_{out}=15\text{mm}$ 、ヤング率 $E_r=5.57\text{Mpa}$ としている。図2(a)は3通りのゴム厚さに対して押し付け力 $F=300\text{N/m}$ 、摩擦係数 $\mu=0.5$ として無次元負荷力 $T/\mu F$ を-0.2から0.6まで変化させたときの速度比を示している。まず、ゴム厚さが薄

(a) Tangential velocity ratio for various T and T_r
($F = 300\text{N/m}$, $\mu = 0.5$)

(b) Tangential velocity ratio for various T and μ
($F = 300\text{N/m}$, $T_r = 5.5\text{mm}$)

Fig. 2 Calculation results of tangential velocity ratio

いほうが紙の速度は早くなっていることが分かる。また、紙のテンション T を0から大きくしていくと固着領域のゴムローラ表面の伸びは小さくなり、 $T/\mu F$ の大きい領域では逆に縮んだ状態で接触・固着して速度比が1以下になることが分かる。さらに、紙のテンション T が負の場合、すなわち紙にフォワードテンションが作用し、紙もゴムローラを駆動している場合には、紙の速度はゴムローラ速度を上回ることが分かる。図2(b)は押し付け力 $F=300\text{N/m}$ 、ゴム厚さ $T_r=5.5\text{mm}$ のとき、3種類の摩擦係数に対して無次元負荷力 $T/\mu F$ を-0.2から0.6の範囲で変化させたときの速度比を示す。無次元負荷力が同じでも摩擦係数が大きいと実際に作用している負荷力は大きくなるので負荷力の影響が大きく現れ、ゴム表面が縮む傾向が捉えられている。

3 実験的検証

3.1 実験装置と実験方法 前節で示した理論計算結果を検証するため、ゴムローラと紙の速度比を測定できる実験装置を作成し、実験を行った。図3は実験装置の概略図である。実験装置において、紙幅42mmのエ

Fig. 3 Outline of experimental setup

ンドレスペーパーを用い、3つのガイドローラを紙が循環するようにした。上下のローラは外半径 $R_{out} = 15\text{mm}$ 、長さ 40mm で軸受間距離は 55mm である。実験では上のゴムローラを速度制御モータで一定速度で回転させる一方、紙には図中右側のゴムローラでテンションを作用させた。紙のテンションを制御するためにトルク制御モータを用いている。これにより、ゴムローラの駆動速度を一定に保ったまま、紙にバックテンション～無負荷～フォワードテンションを幅広く与えることができる。モータの定格トルクは $0.159\text{N}\cdot\text{m}$ であり、前章までの解析における紙のテンション T に換算して約 260N/m までの実験が可能である。

また、鋼ローラのブレーキトルクは非常に小さいため、理論解析と同様に紙と鋼ローラとの間にはすべりが生じないと考え、鋼ローラを速度を紙の速度とみなした。

解析結果からゴムローラと紙の速度比は、押し付け力、紙のテンション、ゴムの厚さ、ゴム硬度に影響されることが予想されるので、表1に示す4種類のシリコンゴム製の試験用ゴムローラに対して押し付け力およびバックテンションを変化させたときの速度比を計測した。その際、負荷力は零から全すべり状態 ($-T/\mu F = 1$) まで、もしくは定格トルクまで変化させた。また、回転速度の影響を調べるため $300, 600, 900\text{rpm}$ の3種類の回転速度で実験を行った。

Table 1 Test Rubber Roller

No.	1	2	3	4
Thickness (mm)	3.0	5.5	8.0	5.5
Hardness	69	69	69	29
Young's Modulus (MPa)	5.57	5.57	5.57	1.10

3.2 回転速度比の理論結果と実験結果の比較

図4に回転速度を変化させた場合の紙のテンションと回転速度比の関係を示す。ここでは横軸は紙のテンションと押し付け力の比 T/F を表している。丸、三角、四角の各記号はそれぞれゴムローラの回転速度 $300, 600, 900\text{rpm}$ の場合の測定結果である。ゴムローラ半径 $R_{out} = 15\text{mm}$ であるから、ゴムローラ回転速度 $300, 600, 900\text{rpm}$ に対応してゴムローラ表面速度は約 $470, 940, 1400\text{mm/s}$ であり、現在使われているプリンタの動作速度範囲をカバーしている。図4において、実験結

果の回転速度依存性がほとんど見られないことから、紙の搬送速度とゴムローラ表面速度の比はゴムローラの回転速度に余り依存しておらず、理論解析の仮定の妥当性を示していることが分かる。また、図4において、破線、実線、点線はそれぞれ摩擦係数 $\mu = 0.4, 0.5, 0.6$ とした場合の理論解析結果である。理論解析結果の比較から、 T/F が -0.2 から 0.2 の範囲では摩擦係数を変化させても解析結果に大きな違いは無いこと、また、 $T/F > 0.2$ の領域の実験結果と理論結果の比較から、このゴムローラの摩擦係数はおよそ 0.5 と同定できることが分かる。また、テンションが正の領域(バックテンション)から負の領域(フォワードテンション)まで理論解析により速度比を高精度に予測可能であることが分かる。

本研究で図4を用いて行ったように、摩擦係数は実験的に同定するしかないが、他の摩擦係数測定法による摩擦係数との比較を行うことが必要と思われる。

Fig. 4 Tangential velocity ratio for various rotation speed (Normal Force $F = 307\text{N/m}$, Roller No.2)

図5は押し付け力を変化させた場合の、無次元化した紙のテンションと回転速度比の関係である。実線は $\mu = 0.5$ としたときの理論解析結果である。まず、テンション T の絶対値が小さい領域の比較から押し付け力の影響が実験と理論でよく一致していることが分かる。また、紙にテンションを与えた場合の回転速度比の変化も理論解析結果と実験結果でよく一致している。押し付け力が一番弱い場合において、無次元負荷力が負の領域で理論解析結果と実験結果が多少異なっているが、その理由は押し付け力が小さいため、フォワードテンションに対して定常回転をさせるのが難しい場合であるためと考えている。

図6はゴムローラのゴム厚さを変化させた場合の無次元化した紙のテンションと回転速度比の関係である。実線は $\mu = 0.5$ としたときの理論解析結果である。実験で用いたおもりは図4の場合と同じであるが、ゴム厚さが異なるとゴムローラの自重が異なるため、実際の押し付け力には僅かな違いがあり、理論解析ではこの押し付け力の違いも考慮している。これらの図から分かるように、それぞれのゴムローラ表面の摩擦係数をさほど精密に同定していないが、ゴム厚さが異なる場合においても本解析は実験結果と良く一致している。

図7はローラ番号2と4を用い、ゴム厚さが一定で、ゴム硬さが異なる場合の実験結果と理論結果の比較を

(a) Normal Force $F = 171 \text{ N/m}$

(b) Normal Force $F = 400 \text{ N/m}$

(c) Normal Force $F = 489 \text{ N/m}$

Fig. 5 Tangential velocity ration for various normal force (Roller No.2, 600rpm)

(a) Rubber Thickness $T_r = 3.0 \text{ mm}$
(Normal Force $F = 318 \text{ N/m}$, Roller No.1)

(b) Rubber Thickness $T_r = 8.0 \text{ mm}$
(Normal Force $F = 299 \text{ N/m}$, Roller No.3)

Fig. 6 Tangential velocity ration for various rubber thickness (600rpm)

示している。理論結果はどちらも摩擦係数 $\mu = 0.5$ を用いているが、理論解析はゴム硬さの影響を良く表すことができることが分かる。また、ゴムの表面仕上げおよび紙は同じであるが、ゴムが軟らかい場合には摩擦係数 μ が 0.5 以上の値となっていることが分かる。

Fig. 7 Tangential velocity ration for various rubber hardness

4 結 論

本報告では、軸方向の押し付け力分布が無視できる短軸のゴム挟持ローラによる紙搬送特性を明らかにすることを目的とし、前報のゴムローラ・鋼ローラの摩擦駆動解析の結果をベースとして、2つのローラの押し付け力および紙に作用するテンションを与えて、ゴムローラと鋼ローラによって搬送される紙の速度とゴムローラの回転速度との比を求める理論解析手法を示した。また、ループ状につないだ紙を軸長さ 40 mm のゴム挟持ローラで搬送する短軸ゴム挟持ローラ紙搬送実験装置を用い、ローラの押し付け力および紙に作用するテンションを変化させて紙搬送速度およびゴムローラ速度を測定し理論解析結果と比較して、理論解析結果の有効性・限界性を示した。

参考文献

- [1] 藤村浩・小野京右: スキューロール紙送り機構における紙の運動解析, 機論, 62-596, C, (1996), pp.1354-1360
- [2] 山浦弘, 小野京右, 高橋有亮, 中澤高志: 鋼芯を有するゴムローラの Green 関数とゴムローラ・鋼ローラ間の摩擦駆動解析, 日本機械学会論文集 (C), 2002-3