

物理ベースアニメーション手法を利用した
 パッケージングプロセスシミュレーションの研究 (第3報)
 — 座屈現象を考慮した包装フィルム変形シミュレーション —

北海道大学 ○橋田 祐樹, 金井 理, 岸浪 建史
 東京自動機 中村 孝太郎, 佐藤 昇一, 丸岡 正知

要 旨

フィルムを用いる自動パッケージング機では包装不良を起こさない運転条件の発見のため、実機上で多くの調整時間が必要である。この問題の解決のため、本研究ではフィルムの変形挙動を解析可能なシミュレータの開発を目的としている。本報では前報までに報告したフィルムの特性に加え、新たにフィルムの座屈現象を考慮したモデル化を行うことで、パッケージング作業の初期段階における包装不良の発生と関連があるフィルムの圧縮に伴うしわの発生現象の予測が安定して行える変形シミュレーションを開発する。

1. はじめに

製品をフィルム包装する際に使用される自動パッケージング機は、包装プロセスを高速かつ安定に行うために、動作速度と機構部の調整を行う必要がある。この調整作業には多くの時間が費やされており、その解決にコンピュータシミュレーションの利用が求められている。しかし、これまで3D-CADや3D-CAEにおいて、包装に用いられるポリマーフィルムのような薄く柔軟な材料の変形シミュレーションを実施した例はほとんど報告されていない。

そこで本研究では、柔軟な包装フィルムによる包装プロセスをシミュレーションできるシステムの開発を目的とする。前報では離散シェルモデルに適応的メッシュ分割を応用したフィルムのモデリングとシミュレーション例を報告したが[1]、包装不良を引き起こすフィルムのしわ発生モデル化をすることができなかった。本報ではその問題解決のために、フィルムの座屈によるしわ発生を考慮したフィルム変形シミュレーションモデルについて報告する。

2. シミュレーションの概要

パッケージング機内での実プロセスを図1で示す。包

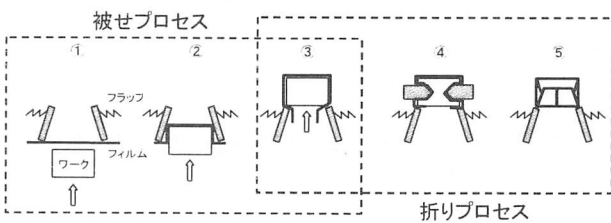


図1 パッケージングプロセス

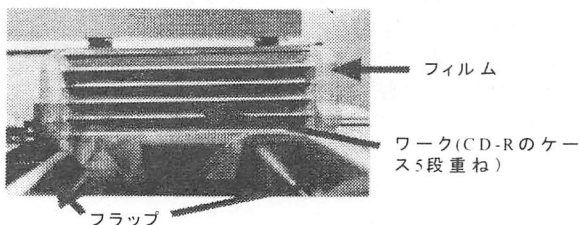


図2 被せプロセス終了時のフィルム端部の状態

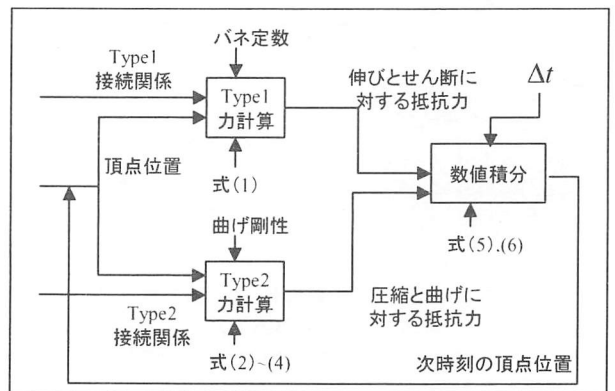


図3 シミュレーション概要

装プロセスの良否は①から③の被せプロセスにおけるフィルム変形挙動に依存するため、この①から③までをシミュレーションの対象とする。また図1で示すプロセス③におけるフィルム端部の実状態を図2に示す。

シミュレーションの概要を図3に示す。包装フィルムは離散的な質点が相互に接続されているパーティクルモデルによりモデル化される。システムは包装フィルムの伸びとせん断に対する抵抗力を計算し、同時に曲げと圧縮に対する抵抗力も計算する。最後に計算された力を用いて、数値積分により次時刻の頂点位置を計算する。数値積分には二階後退差分による半陰解法を用いる。座屈固有の現象は曲げと圧縮に対する抵抗力で考慮される。

3. フィルム変形モデル

3.1 パーティクルモデル[2]

フィルムのモデル化には質点を頂点に持つパーティクルの四角形メッシュからなる図4のパーティクルモデルを用いる。各パーティクル(頂点)は $P(m,n)$ とラベル付けされる。境界上にある場合を除き、各パーティクルは図4で示されるように2種類の接続性を持っている。図4の実線で示した接続をType1の接続と呼ぶ。Type1の接続により $P(m,n)$ は $P(m\pm 1,n) \cdot P(m,n\pm 1) \cdot P(m\pm 1,n\pm 1)$ に接続され、接続されたパーティクル間には伸びとせん断に対する抵抗力が働く。また、図4の

点線で示した接続を Type2 の接続と呼ぶ。Type2 接続により、 $P(m,n)$ は $P(m\pm 2,n) \cdot P(m,n\pm 2) \cdot P(m\pm 2,n\pm 2)$ に接続され、各パーティクル間には曲げと圧縮に対する抵抗力が働く。

3.2 伸びとせん断に対する抵抗力

以下では議論を簡単にするため、 $P(m,n)$ を $P(i)$ 、 $P(m,n)$ に接続するパーティクルを $P(j)$ と表す。 $P(i)$ に作用する伸びとせん断に対する抵抗力 f_i^a は単純な線形バネモデルで表現され、式(1)で表される。

$$f_i^a = \begin{cases} k_s (|x_{ij}| - L) (x_{ij} / |x_{ij}|) & : |x_{ij}| \geq L \\ 0 & : |x_{ij}| < L \end{cases} \quad (1)$$

ここで x_i は $P(i)$ の位置ベクトルであり $x_{ij} = x_j - x_i$ 、 L は自然長、 k_s は伸びとせん断に対するバネ定数を表す。圧縮に対する抵抗力は Type2 の接続で計算されるため、ここでは計算しない。

3.3 座屈を考慮した曲げと圧縮に対する抵抗力

パーティクルモデルの座屈は、次の様にして考慮される。最初に図 5(a)で示すように座屈が生じていないとして、圧縮に対する抵抗力 f_i^b を式(2)を用いて計算する。次に図 5(b)で示すように座屈が生じたとして、曲げに対する抵抗力 f_i^c を式(4)を用いて算出する。 $P(i)$ に作用する抵抗力は、 $|f_i^b| \leq |f_i^c|$ であれば f_i^b を採用し、逆に $|f_i^b| > |f_i^c|$ であれば f_i^c を採用する。

圧縮に対する抵抗力 f_i^b は線形バネモデルを用いて、式(2)で表される。

$$f_i^b = c_b (|x_{ij}| - L) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (2)$$

ここで c_b はユーザが選択する定数であり、通常は k_s と等しい値を割り当てる。

また、座屈後の状態を図 5(b)に示すように形状を長さ L である円弧として近似すると、曲率は式(3)で表せる。

$$\kappa = 1/r = (2/L) \operatorname{sinc}^{-1} \left(\left| \frac{x_{ij}}{L} \right| \right) \quad (3)$$

ここで $\operatorname{sinc}(y) = (\sin y) / y$ である。

曲げに対する抵抗力 f_i^c は κ を用いて式(4)で表される。

$$f_i^c = k_b \kappa L \frac{dx}{d|x_{ij}|} \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (4)$$

ここで、 k_b は曲げ剛性を表す。

3.4 頂点の位置更新

外力としてフラップとの摩擦抵抗力、真空圧による外力、重力を考慮する。フィルムと物体(ワーク・フラップ)との干渉は、フィルムのメッシュモデルの各頂点の座標値を強制的に変更することで表現される。

運動方程式は式(5)で表される。式(5)の二階後退差分による近似を用いると式(6)のように表される。

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{X}} \\ \dot{\mathbf{V}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F} \end{pmatrix} \quad (5)$$

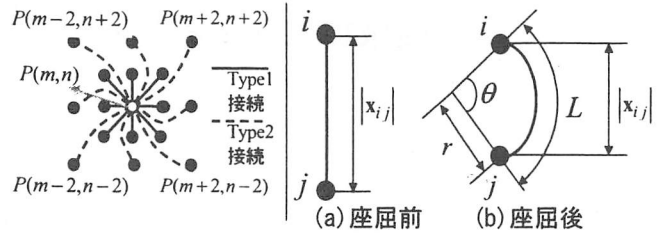
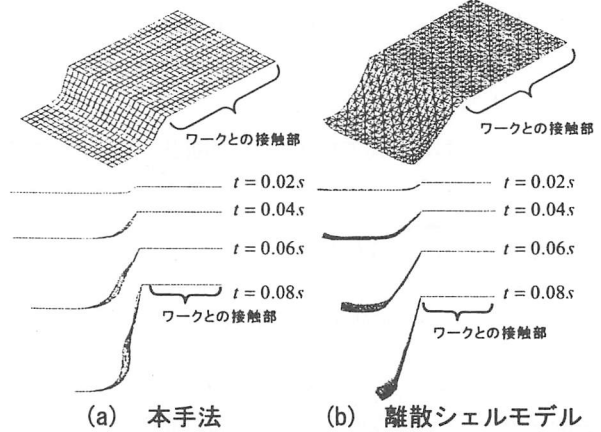


図4 パーティクルモデル

図5 パーティクルモデルの座屈による状態変化



(a) 本手法 (b) 離散シェルモデル

図6 シミュレーション結果

$$\frac{1}{\Delta t} \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \mathbf{X}^{n+1} - 2\mathbf{X}^n + \frac{1}{2} \mathbf{X}^{n-1} \\ \frac{3}{2} \mathbf{V}^{n+1} - 2\mathbf{V}^n + \frac{1}{2} \mathbf{V}^{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}^{n+1} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}^{n+1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{X}^n 、 \mathbf{V}^n はそれぞれ時刻 n における位置、速度ベクトルを並べた行列を表し、 \mathbf{M} は質量行列を表す。また、ダンピングは \mathbf{F}^{n+1} の項に含まれる。式(6)において、 \mathbf{V}^{n+1} を消去することで、次時刻の頂点位置 \mathbf{X}^{n+1} が求まる。

4. シミュレーション結果

以上のシミュレーションシステムの有効性を調査するため、フィルムをワーク上に被せ、自重で変形させるシミュレーションを行った。初期メッシュとして頂点数 $35 \times 20 = 700$ のメッシュを用いた。またシミュレーション条件として $k_s = 1000$ 、 $k_b = 10000$ 、各頂点の質量 $m = 0.565g$ とした。使用した PC は、Pentium IV 2.8GHz、メモリ 1024MB である。

実験によって得られたフィルム側面の端部の状態を図 6(a)に示す。また比較対象として離散シェルモデルを使用した結果を図 6(b)に示す。しかし、本シミュレーションは $t = 0.08s$ 以降では頂点の位置更新が不安定になるため、しわの発生までには至らなかった。

5. おわりに

本報では、座屈を考慮したモデルを用いてフィルムをモデル化し、またそのモデルを用いてシミュレーションを行った。今後の課題として、不安定性の解消、現実のフィルム挙動との相関の検証がある。

【参考文献】

- [1]橋田他, “物理ベースアニメーション手法を利用したパッケージングプロセスシミュレーションの研究(第2報)” 2004 精密工学会秋季講演大会論文集(掲載予定)
- [2]K.Jin et al. ” Stable but Responsive Cloth“ *ACM Transactions on Graphics*, 21(3):604-611, SIGGRAPH 2002