Vol.2014-CG-154 No.19
2014/2/21

樹脂フィルムの熱変形シミュレーション

奥成貴大[†1]　　宮田一乗[†1]

本報告では，商品梱包で用いられるパッキング形状を，CG で表現する手法を提案する．パッキングはその透明性や光沢性から，商品価値を高める要因として重要視されている．パッキングには加熱することで収縮変形する樹脂フィルムが用いられており，フィルム表面上の熱分布により様々な収縮が見られる．提案手法では，質点バネモデルをベースに樹脂フィルムをモデル化し，バネ係数及び抵抗係数の熱による変化を取り入れることで熱収縮の様子を再現した．梱包形状をフィルムで包み熱収縮によりフィッティングすることでパッキング形状を表現する．バネ係数の変化には，高分子のビーズ・スプリングモデルを取り入れ，抵抗係数の変化には，Vogel-Fulcher 則による粘性変化を利用した．フィルムに与える熱分布は外部テクスチャとして制御を行う．最後に，変形したフィルム形状をレンダリングすることでパッキング形状の外観を表現した．

A Method of Thermal Deforming Simulation for Plastic Film

TAKAHIRO OKUNARI[†1]　KAZUNORI MIYATA[†1]

This paper proposes a method to represent change in the packing shape by means of CG. Packing is an important factor to improve the perceived quality of goods. This plastic films which will be contracted when heated is used for packing. This film changes to various shapes caused by the heat distribution. The proposed method represents the shrinking process, adding heat to spring coefficient and resistance coefficient based on the mass-spring model. After wrapping an object for packing, representing the packing shapes to fit when applying heat. This represents a change in the spring coefficient to adopt the Bead-Spring model from field of polymer chemistry. In addition it also represents a change in the resistance coefficient to adopt the Vogel-Fulcher law. We control the heat distribution given to the films by an external texture. After the deformation, the method renders an image of the packing shape appearance.

1. はじめに

本研究では商品梱包材として用いられるシュリンクフィルムの収縮形状（パッキング形状）をコンピュータ上で再現することを目的とする．シュリンクフィルムは，商品に緩やかに巻きつけた後に，熱を加えることでフィルムが収縮して梱包物を固定できる．今日私達の身の回りにはシュリンク包装された商品が数多く存在する．図 1 にシュリンク包装が施された商品の一例を載せる．シュリンク包装は同形状の商品をまとめることで物流の効率化，そして食品や薬品のビンを固定することで内容物の改竄を防ぎ，商品の安全性を保つ役割がある．また，その高い透明性や優れた印刷性能から商品に対する訴求効果を高める要因として利用され，今後もより高い需要が見込まれている[1]．最近ではデザイン性を意識した異型容器も数多くあり，どんな形状にもフィッティング出来るシュリンクフィルムは商品ラベルとして幅広く利用される．

こうした背景から，今後も数多くのフィルム需要が見込まれるため商品デザインを試作する重要性が求められる．本研究では，シュリンクフィルムの収縮を表現するためにフィルムの原料である高分子材料の特性から，収縮を制御する手法を提案する．フィルムはバネ質点モデルを用いて構成を行い，収縮の際にはユーザが収縮の異方性をパラメータで指定し，パッキング形状を操作できる．本研究では，フィルム収縮から梱包形状へのフィッティング及びレンダリングまで行う．結果として，実物のシュリンク包装とレンダリング結果との比較を行い，その再現性について考察した．

図 1 シュリンク包装の例
Figure 1 Example of packings.

2. 関連研究

本研究の位置づけとして，CG を用いたデザイン検討事例を述べる．ArtiosCAD では CAD 上で 3D モックアップを作成し，店舗内を撮影した写真と重ねることで陳列時にデザインが与えるインパクトを事前に検証できる[2]．これは商品デザインの作成から店舗に陳列されるまでの流れを検

†1 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

討でき，効果的なマーケティング展開を行う上で有効である．モノサツ 3D ではポテトチップの袋や缶ビールなどのモデル形状をテンプレートして保存しておき，商品ラベルのみを張り替えて完成品のプレビューが行える[3]．このツールでは，メーカの販売戦略などにより商品形状を変更せずに包装のみを変更する場合に，新商品の見栄えの確認やデザインの検討を行うことが出来る．商品化以前にコンピュータ上で見栄えの訴求効果を確認できるのは商品開発において有効な手段である．本研究ではシュリンク包装を対象に，その見栄えが商品に与える訴求効果を事前に確認できるシステムを目指す．

フィルム構造の表現方法として，布に関する研究を上げる．布の表現方法には様々な手法があるが，その中でバネ質点モデルにより構成された布モデルは，残留変位や戻り変位を直接制御でき比較的高速に計算できることから数多くの研究で用いられている．バネで布を構成して水濡れの挙動を表現する研究[5]や，バネで構成したストッキングで疎密を表現する研究[6]も，バネ質点により構成されたモデルを用いている．本研究でもバネ質点モデルを用いてフィルムを構成するが，バネに異なる熱を割り当て局所的な収縮変化を表現できるところに従来手法との違いをあげる．

形状のフィッティング例として，ポイントクラウドに対して内側から形状に合わせたもの[7]や，複数の凸包形状を組み合わせて形を作る研究[8]がある．前者はシュリンク時のフィルムの張りは表現できず，後者では凸包のため大きくくぼんだ形状は表現できない．本研究では、梱包の対象物を包含したフィルムを収縮させることで生成される，フィルム形状の張り具合を表現する．

3. 手法の概要

本章では，対象であるシュリンクフィルム及び提案手法の概要について説明する．

3.1 対象となるシュリンクフィルム

シュリンク包装で用いられるフィルムはプラスチック材料の熱可塑性特性を利用して成形・製造される．図 2 に示すように粒子状材料を溶解し整形した無延伸フィルムに対して，再度加熱を行い延伸して冷却したものがシュリンクフィルムとなる．プラスチックの高分子は微視的にはバネ弾性の特性があり，シュリンクフィルムはバネを伸長した状態であると考えることができる．シュリンクフィルムは，再加熱することで無延伸フィルムの大きさになるまで収縮する．これは，熱を外因として，伸長されたバネが収縮するモデルと考えられる．本研究では，この特性を表現するために，予め伸長されたバネが熱の影響で収縮する手法を提案する．

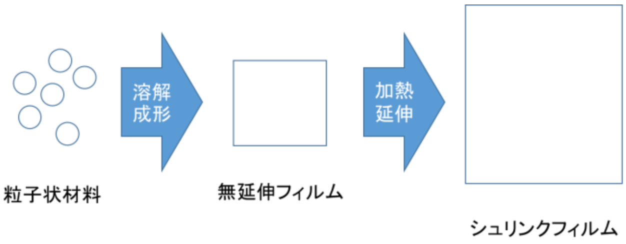


図 2 シュリンクフィルムの製造工程
Figure 2 A manufacturing process of shrink film.

3.2 提案手法の流れ

フィルムのフィッティングを表現する上で，本研究では収縮の異方性と熱による収縮速度の違いに着目しており，その収縮を表現する手法を提案する．

図 3 に提案手法の大まかな流れを示す．まずバネ質点モデルを用いて梱包形状を包むフィルム形状を作成し，各質点に加わる力を計算することでフィルムを変形する．収縮過程でフィルムと梱包形状の干渉チェック及び位置の補正処理を行い，梱包形状へのフィッティングを表現する．最後に，得られた形状データを用いてレンダリングを行うことで結果画像を得る．

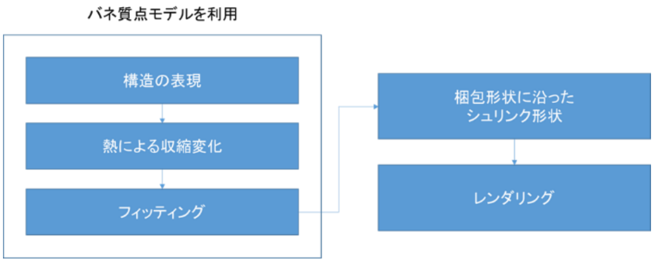


図 3 提案手法
Figure 3 Process overview.

4. フィルムの収縮モデル

本章では，対象となるフィルムの収縮モデルについてその概要を説明する．

4.1 高分子バネの変化

一般的なゴム弾性の場合，分子運動性は考慮していないので，運動性と粘性の関係は出てこない．すなわち，一般的な弾性体モデルではシュリンクフィルムの挙動がシミュレーションできない[9]．フィルムの形状が、室温では変化せず，高温下でシュリンクするためには，分子鎖内部の運動を考慮する必要がある．高分子材料を微視的に見ると，鎖状に連なった分子が数多く繋がれて構成されている．この分子鎖は N 個のバネと N+1 個の小球とが交互に連結されるビーズ・スプリングモデル（Rouse モデル）として表現でき[10]，これはバネ質点モデルで表現できる．図 4 に Rouse モデルの模式図を示す．なお，高分子同士を結合する点を架橋点，架橋点間に繋がる高分子を分子鎖と呼称し

Vol.2014-CG-154 No.19
2014/2/21

図示する．

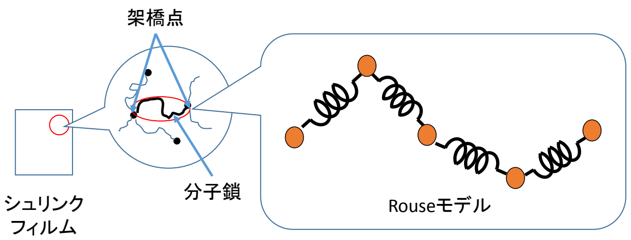


図 4 ビーズ・スプリングモデル（ラウスモデル）

Figure 4 Beads-Spring model (Rouse model).

高分子バネの弾性は配向エントロピーが支配しているため，弾性係数 $\boldsymbol{K}$ は統計的に式(1)のように表現される．架橋点間に構成された分子鎖を考えた場合，$\boldsymbol{K}$ は架橋点間にある単位体積あたりの分子数を用いて表現できる．ここで$\boldsymbol{\rho}$は密度，$\boldsymbol{R}$は気体定数，$\boldsymbol{M_X}$は架橋点間分子量，$\boldsymbol{T}$は絶対温度を示す．ここから $\boldsymbol{K}$ は絶対温度$\boldsymbol{T}$に比例することがわかる．また，高分子は液体及び固体の両方の特性を有する粘弾性体であるため，分子運動で発生する摩擦抵抗，すなわち粘性係数$\boldsymbol{\eta}$は温度に依存する．この温度依存性は Vogel-Fulcher 則で表現され，式(2)のように定義できる．ここで$\boldsymbol{B}$は任意係数，$\boldsymbol{T_A}$は活性化温度，$\boldsymbol{T_V}$は Vogel 温度，$\boldsymbol{T}$は絶対温度を示す．

$$K(T) = \frac{3\rho RT}{M_x} \tag{1}$$

$$\eta(T) = B\exp\left(\frac{T_A}{T-T_V}\right) \tag{2}$$

以上より高分子バネの運動は式(1)の弾性係数及び，式(2)の粘性係数を持つ運動と捉えることが出来る．式(3)に高分子バネを想定した運動方程式を示す．

$$m\frac{d^2X}{dt^2} = -K(T)X - \eta(T)\frac{dX}{dt} \tag{3}$$

ここで$\boldsymbol{m}$は質量，$\frac{d^2X}{dt^2}$は加速度，$\boldsymbol{X}$ は高分子バネの自然長からの変位変化，$\frac{dX}{dt}$は速度を示す．シュリンクフィルムの収縮過程を見ると，フィルムは加熱されることにより，無延伸フィルムの大きさに至るまで収縮を繰り返すが，無延伸フィルムよりも縮まることは無いため，この収縮運動はバネの長さが自然長に至るまでの漸近減衰であると仮定できる．

$\gamma(T) = \frac{\eta(T)}{2m}$，$\omega_0(T) = \frac{\sqrt{K(T)}}{m}$と置いて，$\gamma(T)$，$\omega_0(T)$の値を比較すると，微分方程式の漸近減衰の条件（$\gamma \gg \omega_0$）に当てはまる．これより高分子バネの変位変化を温度 $\boldsymbol{T}$[K]と時間 $\boldsymbol{t}$[s]を要素とする漸近減衰として表現を行う．式(4)は漸近減衰の一般解を示す．

$$X(t,T)=A\exp\left(\left(-\gamma(T)+\sqrt{\gamma(T)^2+\omega_0(T)^2}\right)t\right)+ \\ +B\exp\left(\left(-\gamma(T)-\sqrt{\gamma(T)^2+\omega_0(T)^2}\right)t\right) \tag{4}$$

初期条件として$\boldsymbol{t=0}$における位置及び速度を$\boldsymbol{X(0) = l_0}$，$\boldsymbol{v(0) = 0}$とすると，$\boldsymbol{\gamma \gg \omega_0}$の関係から式(4)の第 2 項はほぼ 0 となる．これは分子鎖内部の運動が分子鎖全体よりも速く緩和することを示している．後述するフィルムの大域変形におけるバネの自然長変化として，式(4)の高分子バネの変化を取り入れる．

図 5 に異なる温度設定でのバネの収縮変化を計算した様子を示す．低温，とりわけ室温程度(20℃)であれば収縮は発生せず，高温に移行するほどより速く自然長の長さに落ち着く様子が確認できた．これにより熱による収縮変化のモデルを表現することが可能である．

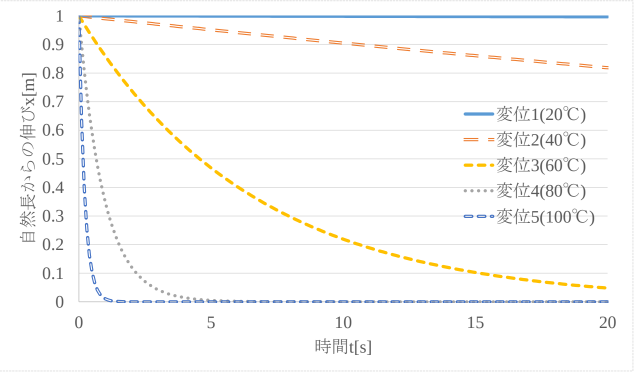


図 5 温度[T]と時間[s]による変位変化

Figure 5 The displacement change by T[T] and t[s].

4.2 大域的な変形

4.1 節では熱を外因とした高分子バネの収縮について述べた．しかし，フィルムの変形を行うためには大域的な運動を考慮する必要がある．そのため，大域的なフィルムの変形にはバネ質点モデルを用いた布シミュレーションを行うことで表現する．ただし，重力の影響は考慮しない．本手法では Choi ら[8]により提案されたバネ接続モデルのうち，引張に関わる構造バネ及び剪断バネの接続を利用した．構造バネは，各質点に対して上下左右方向に隣接した質点との間を接続したバネであり(図 6(a))，剪断バネは斜め方向に隣接した質点との間を接続したバネである(図 6(b))．各質点に対して，これら 2 種類のバネ接続から得られた合力を質点に働く力として計算する．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

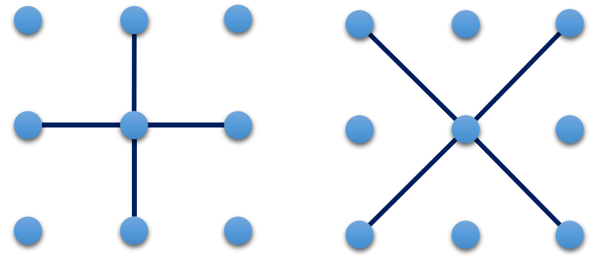


図 6 構造バネ(a)及び剪断バネ(b)
Figure 6 Structural Spring(a) and Shear Spring(b).

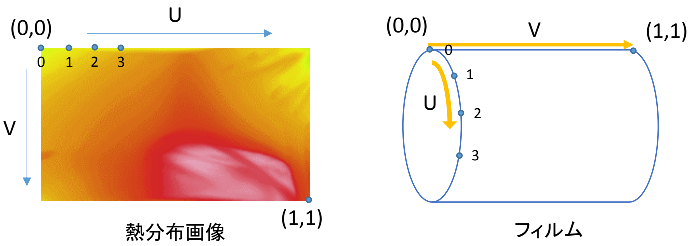


図 8 熱分布画像とフィルム質点との関係
Figure 8 Correspondence between heat distribution image and film mass-points.

式(5)にバネに働く力を示す．この力は質点$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$の間に働く力であり，$\boldsymbol{x}$はその質点の3次元座標，$\boldsymbol{l_0}$はバネの自然長，$\boldsymbol{k}$はバネ定数を表す．通常での布シミュレーションと異なり，本手法ではバネの自然長が温度に依存するモデルを用いる．このモデルでは，バネの自然長は可変であり，収縮した分だけ引き合う力が強くなる．なお，ここで$\boldsymbol{l_0(t,T)}$は式(3)のバネ変位$\boldsymbol{X(t,T)}$と同様なものを用いる．

$$\boldsymbol{F_i}^{spring} = \boldsymbol{k}\left(\left|\boldsymbol{x_i}-\boldsymbol{x_j}\right| - \boldsymbol{l_0(t,T)}\right)\frac{\boldsymbol{x_i}-\boldsymbol{x_j}}{\left|\boldsymbol{x_i}-\boldsymbol{x_j}\right|} \quad (5)$$

時間$\boldsymbol{t}$における全ての質点に対してバネの力を計算することで，微小時間 $\boldsymbol{dt}$ 後の質点の速度及び位置を更新する．

4.3 熱分布の設定

フィルムに与える熱を制御する上で，熱分布情報が書き込まれたテクスチャを用いた．これは実際にドライヤーから発した熱風をフィルム上に照射した際の状態をサーモカメラでキャプチャしたデータを用いている．図 7 に熱分布画像の例を示す．熱分布を利用する際は，熱画像を 256 階調のグレイスケールとして扱う．図 8 に熱分布画像とフィルムの対応関係を示す．熱分布画像は(0,0)から(1,1)の範囲で正規化した UV 座標系で表現する．形状を覆うフィルムも同様に正規化 UV 座標系とフィルムを構成する質点位置を対応づける．熱データの補間が必要な場合は線形補間を行う．バネに与える熱は，バネ両端に接続された質点の熱平均を温度として設定した．

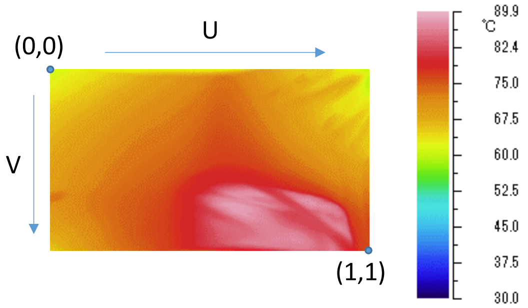


図 7 熱分布画像の例
Figure 7 Example of Heat distribution image.

5. 梱包形状へのフィッティング

本章では，第 4 章でのフィルムの収縮モデルを踏まえ，梱包対象である 3D 形状にフィッティングさせる手法について述べる．

5.1 包み形状のバネ質点モデル

フィルムの形状は梱包形状の寸法を元に設定する．まず，梱包形状を覆う円筒を以下のように設定する．XYZ 空間内に入力モデルを包括する境界ボックスを生成する(図 9(a))．つづいて，境界ボックスの Z 軸の大きさを円筒の長さ $\boldsymbol{L}$ とし，円筒の半径は XY 平面から見た場合の境界ボックス領域を包括するように定める(図 9 (b))．

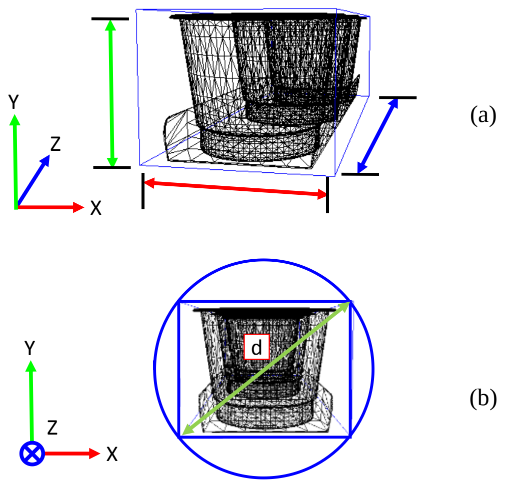


図 9 境界ボックス(a)と対角線長(b)の計算
Figure 9 Calc bounding box(a) and diagonal length(b).

次に，円筒の両端に封をするために，図 10 のように円筒の半径$\boldsymbol{r}$分の余り端を新たに付け加えた．円筒の両端が円筒中心で折り重なるように幾何変形を加え，両端を閉じるために質点とバネを接続しなおす．この円筒では異方性収縮を考慮するため，質点で構成される格子領域の大きさが等方になるフィルム形状を作成した．

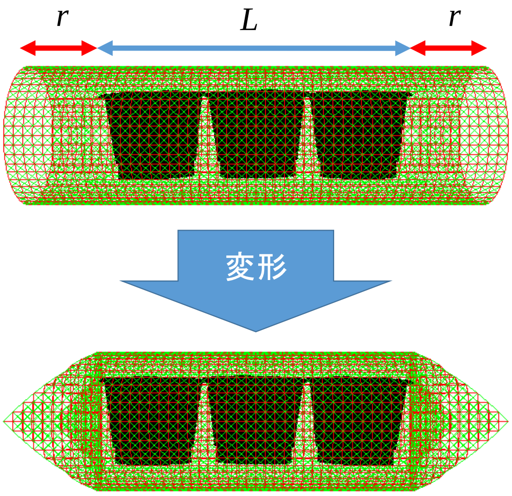


図 10 包み形状のバネ質点モデル

Figure 10 Mass-spring package model.

バネの自然長l_0の変化は無延伸フィルムに至る自然長に落ち着くまで続くが，収縮後の自然長設定はユーザが収縮比を設定することで変更できる．ユーザは図 11 に示すような，水平軸方向の収縮率$\propto_h$及び垂直方向の収縮率$\propto_v$を設定する．これにより，収縮後の格子の大きさは図 11 右の寸法で表現できる．フィルムを構成する格子は等方性が維持された初期形状で作成されるため，フィルムの加熱後にこの等方形状から設定した収縮率に落ち着くまでバネの長さを縮める．これにより異方性を考慮した収縮を表現する．

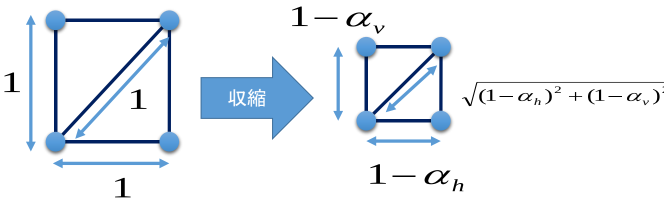


図 11 収縮率による変形

Figure 11 deformation depends on shrink ratio.

5.2 フィッティング

5.1 節より作成したフィルム形状に熱分布を割り当てて収縮を開始させる．伸長されたバネが加熱によって短くなり，包み形状のバネ質点に加わる力を計算することで，図 12 のように梱包形状を締め付ける方向に質点が移動する．このとき，梱包形状の内部に質点が進入する移動を制限することによってフィッティングが実現される．

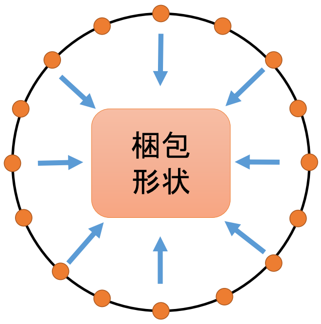
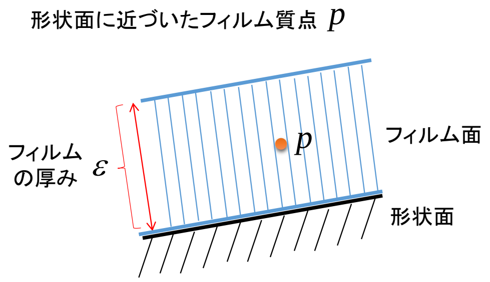


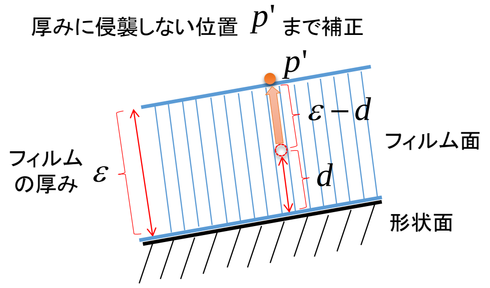
図 12 包形状バネ質点モデルの形状へのフィッティング

Figure 12 Fitting mass-spring model to target shape.

図 13 は梱包形状とファイル形状との干渉チェックを示す．フィルムは厚みεを持つものとし，干渉チェックの対象である質点$\boldsymbol{p}$は梱包形状から$\boldsymbol{\varepsilon}$の範囲に侵襲しないような処理を行う．図 13(a)に示すように質点$\boldsymbol{p}$が侵襲した場合，図 13(b)に示すように侵襲した分だけ梱包形状面を法線方向に移動させる．ただし，この補正処理を行うのは，質点が梱包形状面の上部に位置するときのみ限定する．質点が梱包形状面の上部に位置するかどうかは，質点から梱包形状面へ垂線を降ろした場合，梱包形状面と衝突するか否かを調べることで判定が可能である[10].



(a)



(b)

図 13 厚みを考慮した移動の修正

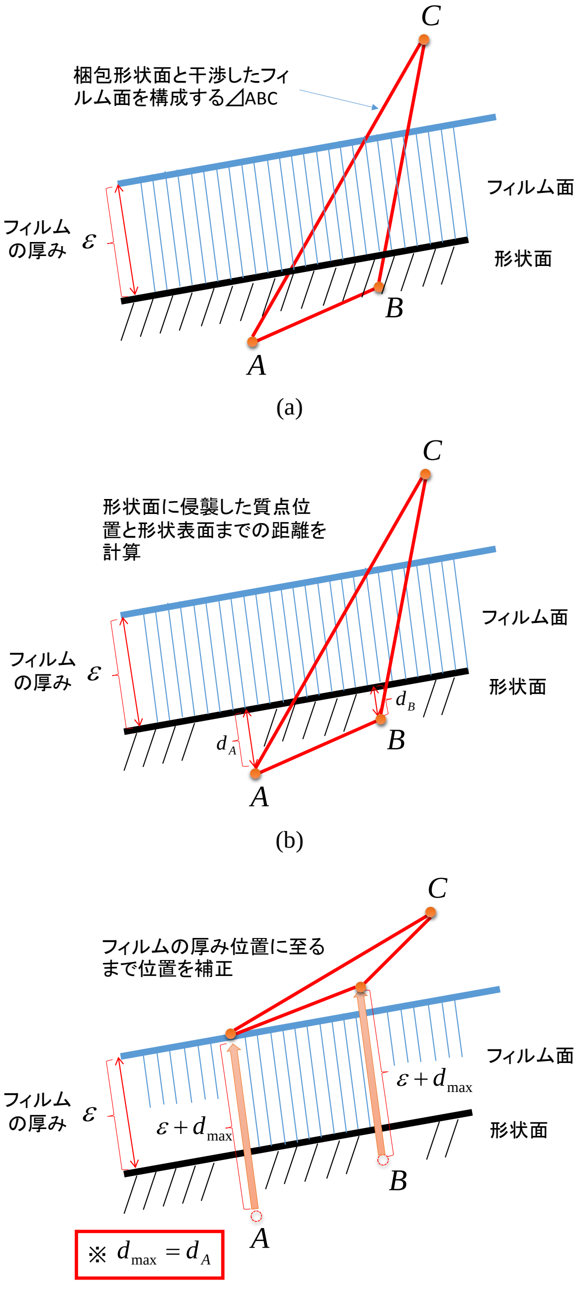
Figure 13 Modified move considered thickness.

5.3 フィルムと梱包形状の干渉制御

また，質点のみの位置補正だけでは交差する面や辺での衝突を検出できず，フィルム面が形状内に侵襲する場合がある．そのため，干渉チェックとして三角形同士の衝突を検出し，位置を補正する処理を考慮した．図 14 は，フィ

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

ルム面を構成する三角形 ABC が形状面に侵襲する様子を示す．干渉チェックとして Tomas[12]の手法を用いて三角形同士の衝突判定を用いた．図 14 (a)に示すように質点 A，B が形状面に侵襲した場合，図 14(b)に示すように侵襲した質点位置から形状表面までの距離をそれぞれ求める．その際，侵襲距離が最大なものを押し戻す距離として利用する．図 14(c)に示すように，最大の侵襲距離にフィルムの厚みを加えた分だけ，梱包形状面からの法線方向に移動させる．これにより，フィルム面と形状面が交差した場合に，梱包形状面からフィルムの厚みの範囲に，フィルム面を構成する質点が侵襲しない補正を行うことができる．



(c)

図 14 厚みを考慮した貫通補正
Figure 14 Avoiding penetration considered thickness.

6. 結果

第 5 章で作成したシュリンク形状と実物のシュリンク形状との比較を行った．結果比較を行う上で商品サンプルは予めシュリンク加工が施されており，初期形状の想定が困難である．したがって，シミュレーションで作成したフィルム形状と同寸法のフィルム形状を実際に作成し，比較検討した．比較に用いた 3D 形状を図 17(左)に，商品サンプルを図 17(右)に示す．3D 形状のレンダリングはレンダリングソフト KeyShot[13]を用いて行った. フィルムには半透明材質のマテリアル情報を設定して実物と近い質感表現を行った．シミュレーション結果を図 18 に，レンダリング結果を図 19 に示す．

結果としてフィルムのフィッティングは現実と近しい結果が得られたが，本研究で作成したものは，実物の梱包形状の上下端における局所的な収縮により発生した皺形状が考慮されていない．過度な収縮箇所に対してはフィルムの折れ曲がりが発生するため自己衝突を考慮する必要性がある．

また, 収縮率及び熱分布の変化についてその形状変化を確認した．図 15 は収縮率を変更したフィッティング例を示す．なお，水平軸及び垂直軸方向は図 15 に示したものとする．熱は 80℃付近の分布を全方向から加えたものとする. 収縮率が縦横で異なると収縮率の大きい方向へ伸長方向が偏るため, フィルム端の形状が収縮により異なる様子が確認できた．図 16 に異なる熱分布を割り当てて同じ時間収縮を繰り返した結果を示す．ここで(a)は 60℃付近，(b)は 70℃付近，(c)は 80℃付近，(d)はペイントソフト上で濃淡を描いた局所的な熱分布を示すとする．(a)(b)(c)は全方向から熱を加え，(d)は一定の場所から熱を加えた様子を示している. (d)における熱照射の方向を図 16 中の矢印で示す．与える熱分布のムラに依存して，バネの収縮速度が異なるため，収縮形状に変化が見られた．熱分布に差があるほど, 均一な熱分布と比べてフィッティング位置が崩れる傾向にあった．

現状では，梱包形状から円筒を基に作成したフィルム形状を用いている，この場合，形状の縦横比によってはフィッティング後に過度な余り端ができてしまい，収縮後にフィルムの端が大きく残ることで不適切な外観が生成される場合があった(図 20 の赤枠).

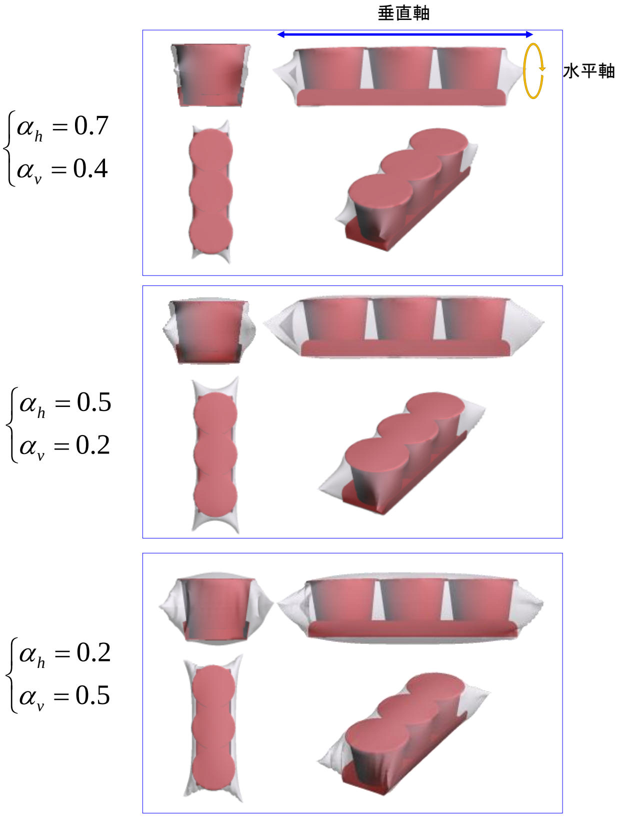


図 15 収縮率による変形例

Figure 15 Example of shape change caused by shrink ratio.

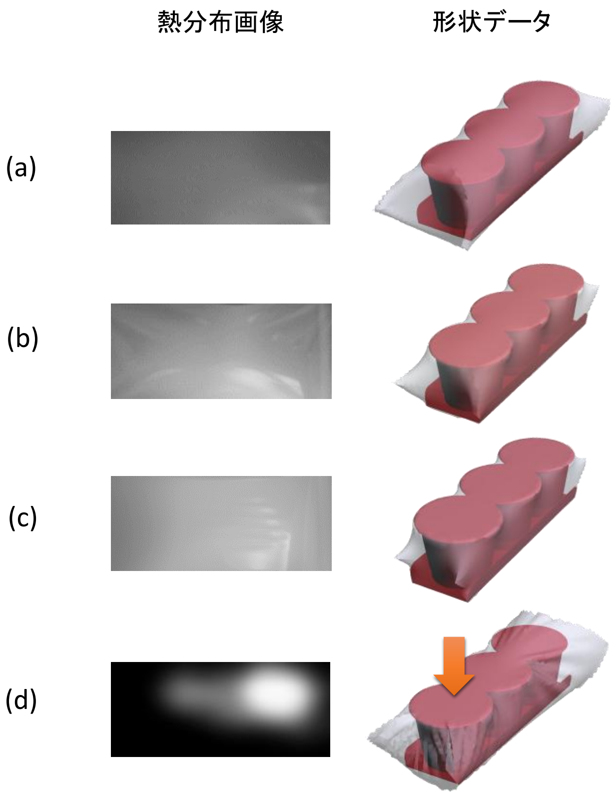


図 16 熱分布による変形例

Figure 16 Example of shape changin caused by head distribution

図 17 3D 形状(左)及び商品サンプル(右)

Figure 17 3D shape(left) and trade sample(right).

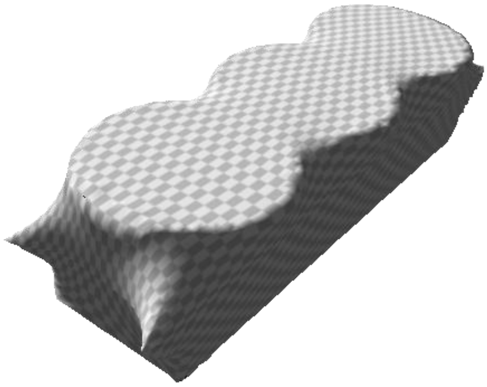


図 18 フィッティングの例

Figure 18 Example of fitting model

図 19 レンダリング結果

Figure 19 Result of rendered image.

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

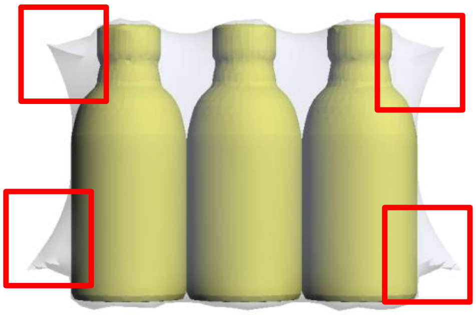


図 20 シュリンク端が大きく余る例
Figure 20 Example of too much shrink edge

7. おわりに

本研究では，商品梱包やデザイン目的で用いられるシュリンク形状を，質点バネモデルで構成したフィルムを収縮しフィッティングすることで表現した．収縮はフィルムが特性として持つ異方性収縮及び熱分布による収縮速度の変化を表現した．そして，得られた形状データをレンダリングし，実物との比較検討を行った．

現状の課題として，計算時間がかかるという点がある．計算時間はフィルム及び梱包形状を構成する格子点数に依存するが，図 18 で示したフィッティング例を得るために約 2.2 時間を要した．本研究は空間分割による判定の効率化を行っているが，それでもフィルムの各質点と梱包形状の面との判定で処理負荷が掛かってしまう．この問題についてはシミュレーションのタイムステップの調整や，実装を最適化させること，GPU を用いた並列計算により高速化する手段などが考えられる．また，フィッティングの精度はフィルムを構成する格子点に依存する．そのため，衝突方向によっては，ポリゴンが形状に浮く事例も見られる．この場合，接触点を基準にポリゴンを細分化することで見た目の改善が見込まれる．

今後は現在のような固定形状のフィルムではなく，梱包形状によって柔軟なフィルム形状の設定が行えるシステムを考慮する必要がある．

参考文献

1) 株式会社グローバルインフォメーション，“ストレッチフィルムおよびシュリンクフィルムの需要は，2015 年に 24 億米ドルへ”，http://www.mdn.co.jp/di/news2u/94100/，2014/01/19 閲覧．
2) 日本製図器工業株式会社，“Artios CAD 総合設計 CAD システム 紙器・パッケージ・緩衝材・サイン他”，http://www.nsksystem.co.jp/product/artios_ver7/．2014/01/21 閲覧．
3) 株式会社 MMD クリエイティブ，“モノサツ 3D とは”，http://www.mdd-creative.com/monosatsu3d.html，2014/01/21 閲覧
4) 山田航，渡辺大地，柿本正憲，三上浩司，竹内亮太，“3DCG における大気圧を考慮した濡れた布の挙動の再現”，NICOGRAPH2012，87-90，2012．
5) 坂口寛典，宮田一乘，“ストッキングの質感表現”，情報処理学会 GCAD 研究会，Vol．2013-CG-150，No．5，pp．1-6，2013．
6) Sharf，Andrei，et al．“Competing fronts for coarse-to-fine surface reconstruction”，Computer Graphics Forum．Vol．25．No．3．Blackwell Publishing，Inc，2006．
7) 五十嵐悠紀，鈴木宏正，“複数の凸包を用いたカバー形状生成”，精密工学会誌 Vol．77（2011） No．11 p．1033-1038，2011．
8) Kwang-Jin，Choi，Hyeong-Seok Ko，“Stable but Responsive Cloth”，ACM Transactions on Graphics（TOG），Volume 21 Issue 3 pp 604-661，July 2002．
9) 久保亮吾，“ゴム弾性[初版復刻版]”，裳華房，1996．
10) G．R．ストローブル，“高分子の物理 構造と物性を理解するために”，シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社，1998．
11) 越塚誠一，“粒子法シミュレーション”，培風館，2008．
12) Tomas Möller，“A Fast Triangle-Triangle Intersection Test”，J. Graphics Tools，2，pp．25-30，1997．
13) KeyShot4，http://keyshot.info/what_is_it，2014/01/22 閲覧．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan