保持対象物体の鉛直断面上に射影した 2次元バインディングモデルの動力学シミュレーション

○三森　友貴（立命館大学），平井　慎一（立命館大学）

Dynamic simulation of two-dimensional binding model projected onto the vertical section of the grasped object

○ Yuki Mimori (Ritsumeikan Univ.), and Shinichi Hirai (Ritsumeikan Univ.)

Abstract : In this paper we propose a formulation of binding and analysis of frictionless holding with binding. Binding has been considered one of the ways to scoop a target object with an surrounded elastic thread. However, the definition of the binding has not been clarified. Moreover, the feature of object holding by binding has not been well researched. We defined sufficient condition of 2-dimensional binding at first. Also, we organized a feature of 3-dimensional binding. At the end, in order to verify the possibility to hold 3-dimensional object without friction, we executed dynamic simulation with simplified 2-dimensional binding model.

1. 緒言

柔軟材料を用いたソフトロボット機構は簡素な制御で多様な物体に適応できる利点を有している [1]．この特徴から，把持対象物体の形状などにばらつきの大きい食品ハンドリングにおいて，ソフトロボットの応用が期待されている．これまでには空気室を膨張させることで指を湾曲させる指型ロボットや，面により物体をすくうように保持する柔らかい機構等が開発されてきた [2]，[3]，[4]．しかしこれらの指型ロボット機構は機構自体の柔軟性から指先位置の制御が困難であり，さらに指先も太いため，食品と食品の隙間に差し込むような操作の実現が困難である．

これに対して，弁当用紙カップの弁当箱への盛り付け作業を主な目的として，バインディングハンドが開発されてきた [5]．バインディングハンドは，鉛直方向に取り付けられた棒の間に張った伸縮する糸の側面を，保持対象物に多方向から囲い込むように押し当てることで，糸で縛り上げるように物体を拘束するロボットハンド機構である．この機構により食品カップなどが保持可能であることが実験的に確かめられてきた．また，糸を張る棒の部分を細くできるため，食品の隙間への差し込みが比較的容易と考えられる．このように，バインディングの特徴が実験を通して機体の構造に基づく形で整理されてきた．しかし，バインディング自体の定義は明確にされていない．また, バインディングによる物体保持の特徴について十分に考察されていない．

本稿ではバインディングの定義を明確にする．まず，2次元空間における平面物体のバインディングを定義する．またこれを用いて，3 次元空間における立体物のバインディングについて考察を行う．さらに，物体と糸の間の摩擦がない場合にもバインディング可能な条件が存在することを確かめるために，摩擦をなくした場合のバインディングの動力学シミュレーションを行った．この結果と考察についても報告を行う．

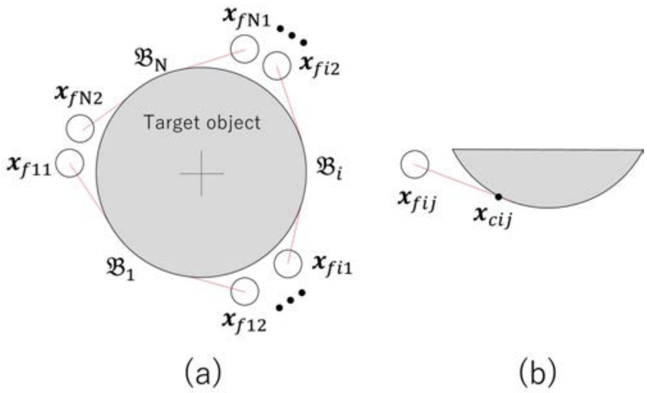


Fig. 1: (a)two-dimensional binding model, and (b)edge point of contact curve.

2. バインディングの定式化

2.1 2次元バインディング

本節では 2 次元平面におけるバインディングの定式化を行う．Fig.1 に示すように保持対象物は正円とし，糸の本数はＮ本とする．このとき糸は反時計回りに $\mathfrak{B}_1, \mathfrak{B}_2, \cdots, \mathfrak{B}_{\mathrm{N}}$，とする．このとき $\mathfrak{B}_i$ を張る 2 本の指の位置ベクトルを時計回りになる順にそれぞれ $\boldsymbol{x}_{fi1}, \boldsymbol{x}_{fi2}$ と置く．さらに，糸と物体が接触している弧の部分を接触曲線 (contact curve) とし，$\boldsymbol{x}_{fij}$ に近い側の接触曲線の端点を $\boldsymbol{x}_{cij}$ とする．

2.1.1　接触曲線の端点座標

接触曲線端点の座標を求める．Fig.2 に示すように，物体および物体と非接触な部分の糸の幾何形状が陰関数表示されているものとする．物体形状を表現する変数を $\boldsymbol{x} = [x, y]^{\mathsf{T}}$，物体の位置ベクトルを $\boldsymbol{p}_o = [x_o, y_o]^{\mathsf{T}}$ と置くとき，物体形状は関数，

$$f(\boldsymbol{x}) \triangleq (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 - r^2 = 0 \tag{1}$$

と表される．

端点 $\boldsymbol{x}_{fij}$，$\boldsymbol{x}_{cij}$ を結ぶ直線部を陰関数表現された直線の方程式 $g_{ij}(x, y) = 0$ で表現する．このとき g_{ij} の傾き α は，

$$\alpha = \frac{y_{fij} - y_{cij}}{x_{fij} - x_{cij}} \tag{2}$$

となる．またこの傾きは $\boldsymbol{x}_{cij}$ における f の傾きに一致するから，

$$\alpha = \frac{dy(\boldsymbol{x_{cij}})}{dx} = -\frac{x_{ci} - x_o}{y_{cij} - y_o} \tag{3}$$

と表せる．よって (2)，(3) より方程式

$$h(\boldsymbol{x}_{cij}) = \frac{y_{fij} - y_{cij}}{x_{fij} - x_{cij}} + \frac{x_{ci} - x_o}{y_{cij} - y_o} = 0 \tag{4}$$

が得られる．したがって (1)，(4) より，

$$\begin{cases} f(\boldsymbol{x}_{cij}) = 0 \\ h(\boldsymbol{x}_{cij}) = 0 \end{cases} \tag{5}$$

のように接触点座標に関する連立方程式を立てることができる．

このとき (5) の解は 2 組得られる．よって解の候補から解を一意に選択する方法を説明する．Fig.3 に示すようにワールド座標系 Σ_w を用意する．これに対して，$\boldsymbol{x}_{fi1}$ から $\boldsymbol{x}_{fi2}$ に向かう方向に x 座標の正の方向を向けた Σ_i 座標系を考える．このとき座標系の変換を回転行列 ${}^wR_i : \Sigma_w \to \Sigma_i$ で定義する．このとき添え字の大きさが反時計回りに増える方向に命名する規則とすることで，${}^i\boldsymbol{x}_i$ は必ず物体中心の右側を通過するように反時計回り方向を指す．よって解は，

$$\begin{aligned} {}^wy_i &= {}^wR_i^{-1}\,{}^i\hat{y}_i \\ {}^i\hat{y}_i &= \min({}^iy_i) \end{aligned} \tag{6}$$

を満たす $({}^wx_i, {}^wy_i)$ となる．

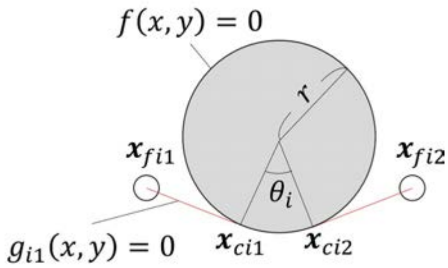


Fig. 2: Geometoric relationship between $\mathfrak{B}_i$ thread and target object defined its shape with implicit function $f(x, y) = 0$.

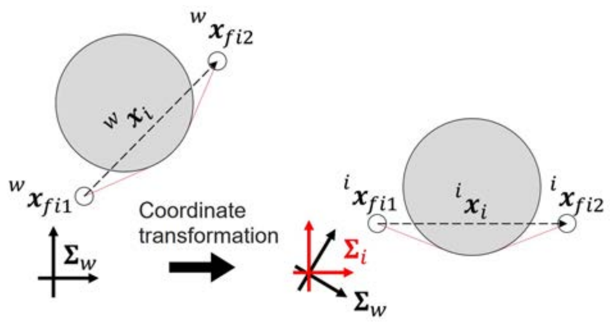


Fig. 3: Coordinate transformation for selecting solution.

2.1.2　弾性エネルギ

接触曲線端点の座標を用いて弾性エネルギを定式化する．糸が変形した後の糸の全体の長さは，$\boldsymbol{x}_{fij}$，$\boldsymbol{x}_{cij}$ を結ぶ直線部の長さ l_{si} と物体に接触している曲線部の長さ l_{ci} の総和である．直線部 l_{si} は，

$$l_{si} = \sum_{j=1}^{2} ||\boldsymbol{x}_{fij} - \boldsymbol{x}_{cij}|| \tag{7}$$

となる．次に曲線部の長さ l_{ci} を求める．曲線部は，Fig.2 における θ_i の角度に対する円弧の長さとして求めることができる．このとき θ_i は余弦定理を用いて

$$\begin{aligned} \theta_i &= \cos^{-1}\Bigl(\frac{||\boldsymbol{x}_{ci1} - \boldsymbol{x}_{ci2}||^2 - \mathrm{A}^2 - \mathrm{B}^2}{-2\mathrm{AB}}\Bigr) \\ \mathrm{A} &= ||\boldsymbol{x}_{ci1} - \boldsymbol{p}_o|| \\ \mathrm{B} &= ||\boldsymbol{x}_{ci2} - \boldsymbol{p}_o|| \end{aligned} \tag{8}$$

となる．したがって曲線部の長さは $r\theta_i$ と表現できるため，糸全体の長さは，

$$l_i = l_{si} + l_{ci} = \sum_{j=1}^{2} ||\boldsymbol{x}_{fij} - \boldsymbol{x}_{cij}|| + r\theta_i \tag{9}$$

である．$\mathfrak{B}_i$ の自然長が l_{i0} の時，$\mathfrak{B}_i$ が弾性係数 k_i を有する場合の弾性エネルギ E_i は，

$$\mathrm{E}_i = \frac{1}{2}k_i(l_i - l_{i0})^2 \tag{10}$$

と表せる．よって N 本の糸全体の弾性エネルギは，

$$\mathrm{E} = \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \mathrm{E}_i \tag{11}$$

である．

2.1.3 指と物体の干渉

指と物体が干渉しない条件を導く．指と物体の幾何関係を Fig.4 に示す．第 i 番目の糸を張る指を反時計回りに，$\mathfrak{A}_{i1}$，$\mathfrak{A}_{i2}$ と置く．ただし $\mathfrak{A}_{ij}$ 指の形状は半径 r_{ij} の円で定義されるものとする．このとき，C-space[6] を参考に物体，指の幾何情報を用いて干渉を表現すると，Fig.5 に示すような以下の開集合が定義できる．

定義 1. (C_{ij} 空間)
指の位置が固定されている時, 物体と指が干渉しない物体位置の集合は，

$$C_{ij} = \{\boldsymbol{x} = [x, y]^{\mathsf{T}} | x^2 + y^2 - (r + r_{ij})^2 > 0\} \tag{12}$$

で与えられる．このとき C_{ij} を $\mathfrak{A}_{ij}$ に対応した C_{ij} 空間と定義する．

このとき，C_{ij} の積集合をすべての指 $\bar{I} \in \mathbb{N}[1, \mathrm{N}]$ に関して取ることで，

$$C = \bigcap_{i \in \bar{I}} C_{ij} \tag{13}$$

が得られる．C は物体が指と干渉せずに動くことができる空間を示しており，これを C 空間と定義する．

また干渉の条件から以下が導かれる．

定理 2. (バインディングに必要な糸が満たす条件)
$\mathfrak{B}_i$ がバインディングに必要な糸ならば,

$$l_{i0} > r_{i1} + r_{i2} + 2r \tag{14}$$

を満たす．

2.1.4 2 次元バインディング可能な条件

2 次元バインディングにおいてバインディング可能な条件を定義する．まず，$i \in I$ に対して，2 本以上糸が選択できて，選んだ糸の添え字番号の集合を I と置く．このとき以下が成立する．

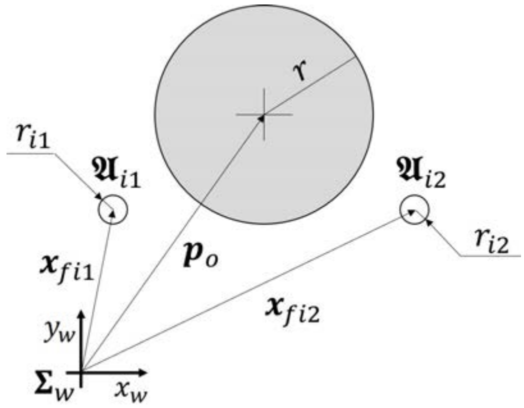


Fig. 4: Geometrical relationship between fingers and target object.

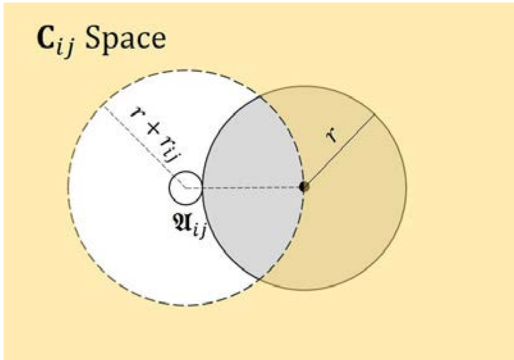


Fig. 5: Freespace of object defined C_{ij}.

定理 3. (指 i に対するバインディング空間)
$I \neq \varnothing$ とする．このとき $\mathfrak{B}_\mathrm{i}$ に対して開集合

$$S_i = \{\boldsymbol{p}_o \in \mathrm{C} | \mathrm{E}_i(\boldsymbol{p}_o) > 0, i \in I\} \tag{15}$$

が存在する．

定理 3 は定理 2 に基づき背理法によって確かめた．
また，バインディング可能な条件は以下の定義で与えられる．

定義 4. (2 次元バインディング可能)
指 i に対するバインディング空間を S_i とするとき，I に対して

$$\mathrm{S}_I = \bigcap_{i \in I} \mathrm{S}_i \tag{16}$$

を I のバインディング空間と定義する．このとき,$\boldsymbol{F} = \partial E / \partial \boldsymbol{p}_o$ の平衡点 $\boldsymbol{p}_{eq}$ がに対して $\boldsymbol{p}_{eq} \in \mathrm{S}_b$ を満たすとき，システムは 2 次元バインディング可能である．平衡点を含む S_I に対応する糸の添え字集合を I_b と表現し，バインディング可能な糸の組合わせと定義する．

このとき，定義 4 は物体と糸の間にはたらく摩擦を仮定

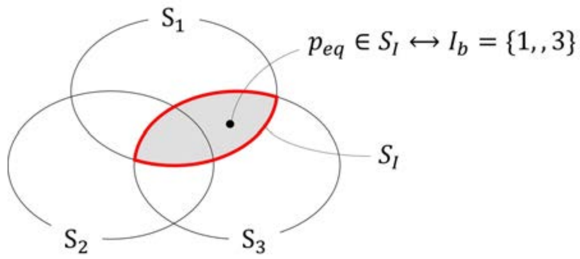


Fig. 6: A relation between S_I and I_b under the condition of that S_I includes equilibum point $\boldsymbol{p}$.

しておらず，モーメントの平衡も考慮していない．また，エネルギ関数 E が S 内で凸関数であるとき平衡点は領域内で唯一であり，平衡点に物体位置を戻すような緩やかな拘束力が働く．

具体例として Fig.6 を考える．平衡点が $S_1 \cap S_3$ に含まれるとき，$I_b = \{1,3\}$ となる．このように，どの指のバインディング空間に平衡点が含まれているかを考えることで，バインディング可能な糸の組み合わせを調べることができる．

2.2 3 次元バインディングの考察

本節では 3 次元物体の場合に摩擦を用いずにバインディング可能な場合について条件を整理する．3 次元空間におけるバインディングは 3 次元的な拘束の意味でのバインディングと，すくいあげの意味でのバインディングに分類する事ができる．　よって，二つのバインディングを分けて考察を進める．

2.2.1 3 次元バインディング

3 次元的な拘束の意味でのバインディングを 3 次元バインディングと定義する．弾性糸により 3 次元的に物体の平行移動が緩やかに拘束された状態を指す．3 次元バインディングは定義 4 を拡張することで以下のように定義できる．

定義 5. (3 次元バインディング可能)
$I \neq \varnothing$ の時,I に対して $S_I \subset \mathbb{E}^3$ なる有界閉集合

$$S_I = \{\boldsymbol{p}_o \in \mathbb{R}^3 | \mathrm{E}_i > 0, \forall i \in I\} \tag{17}$$

を置く．g を重力定数とし $\boldsymbol{g} = [0, 0, -g]^\top$ とするとき，$\hat{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{F} + m\boldsymbol{g} = \partial(E + m\boldsymbol{g}^\top \boldsymbol{p}_o)/\partial \boldsymbol{p}_o$ の平衡点 $\boldsymbol{p}_{eq}$ が $\boldsymbol{p}_{eq} \in S$ を満たすならば，システムは重力下において 3 次元バインディング可能である．

2.2.2 すくいあげバインディング

すくいあげバインディングは下すぼみな形状の物体等を重力に逆らってすくいあげるようなハンドリングを想定している．物体に加わる外力は重力と弾性糸の復元力である．このとき，物体位置が落下などで発散しないような場合にすくい上げバインディングが成立すると考えられる．

3. 摩擦なしバインディングの動力学シミュレーション

前節までは純粋な力のつり合いや幾何的な拘束について議論を行った．定義 5 のように摩擦を仮定せずに物体を拘束できる場合についても考察を進めた．しかし，実際に従来のバインディング機構で物体をハンドリングする際には，すくいあげバインディングが主流であった．第 2.2.2 節に述べたように，物体位置が発散しないような場合にすくいあげバインディングが成立すると考えられる．このとき，摩擦を用いないバインディングが成立可能かどうかは解析的に確かめられていない．そこで本章では，摩擦なしで物体をある領域に拘束する能力の有無について，保持物体の鉛直断面上に射影した二次元バインディングモデルの数値シミュレーションによって検証する．

3.0.1 保持物体の鉛直断面上に射影した 2 次元バインディングモデル

バインディング対象物体が一様双曲面の様に軸対称な側面形状を有する場合を考える．このとき指を Fig.7 のように配置した場合，物体の初期位置が x 軸方向の力成分の平衡点の近傍であれば，幾何的な対称性から x 軸方向への物体の運動は考慮しなくてよい．よって Fig.8 のように x 軸方向の視点から見たときのバインディングのモデルの定性的特徴は，指座標 $\boldsymbol{x}_{fi}$ と接続された $\boldsymbol{x}_{ci}$ が物体側面上を滑るように運動する鉛直断面上の 2 次元モデルで表現可能と考えられる．

Fig.8 の $\boldsymbol{x}_{fi}$ は $\mathfrak{B}_i$ 糸を張る指の $z-y$ 平面上の位置ベクトルを示している．また $\boldsymbol{x}_{fi}$ に対応する接触曲線を鉛直断面に写した時に物体側面上に現れる点を $\boldsymbol{x}_{ci}$ と表す．さらに，$\boldsymbol{x}_{fi}$ と $\boldsymbol{x}_{ci}$ が線形バネでモデル化した弾性糸で接続されている．物体座標を $\boldsymbol{p}_o$ とするとき，糸の弾性エネルギ K と物体の力学エネルギ P は，弾性糸のバネ定数を k，物体の質量を m_o と置くとき

$$\mathrm{K} = \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{2} k ||\boldsymbol{x}_{fi} - \boldsymbol{x}_{ci}|| \tag{18}$$

$$\mathrm{P} = \frac{1}{2} m_o \dot{\boldsymbol{p}}_o^\top \dot{\boldsymbol{p}}_o + m_o \boldsymbol{g}^\top \boldsymbol{p}_o \tag{19}$$

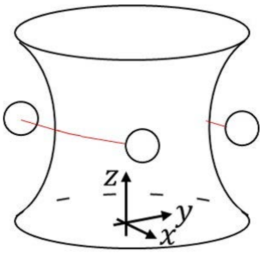


Fig. 7: Three-dimensional binding model in a presence of gravity.

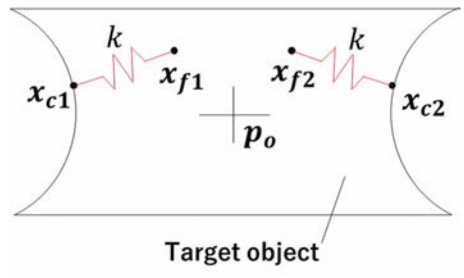


Fig. 8: Dynamic 2-dimensional binding model on vertical section of target object.

となる．よって系のエネルギは $\mathrm{E} = \mathrm{K} + \mathrm{P}$ となる．

また，$\boldsymbol{x}_{ci}$ が物体側面を滑るように移動する接触拘束を，制約安定化法を用いて実装する．物体側面の形状を陰関数 $f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}_o) = 0$，物体姿勢を θ_o と表すとき制約式は，

$$\mathrm{C}(\boldsymbol{x}_{ci}, \boldsymbol{p}_o, \theta_o) \triangleq f(\boldsymbol{x}_{ci}, \boldsymbol{p}_o, \theta_o) = 0 \tag{20}$$

となる．制約式の偏微分を $\mathrm{C}_a = \frac{\partial \mathrm{C}}{\partial a}$, $\mathrm{C}_{ab} = \frac{\partial \mathrm{C}}{\partial a \partial b}$ と略記する．さらに $\boldsymbol{q}_i = [\boldsymbol{p}_o^\top, \theta_o, \boldsymbol{x}_{fi}^\top]^\top$, $\dot{\boldsymbol{q}}_i = [\dot{\boldsymbol{p}}_o^\top, \dot{\theta}_o, \dot{\boldsymbol{x}}_{fi}^\top]^\top$, $\boldsymbol{p}_o = [x_o, y_o]^\top$, $\boldsymbol{x}_e = [x_e, y_e]^\top$ と置き，

$$D(\boldsymbol{q}_i, \dot{\boldsymbol{q}}_i) = \dot{\boldsymbol{q}}_i^\top H_1 \dot{\boldsymbol{q}}_i + 2\alpha H_2 + \alpha C^2 \tag{21}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{x_o x_o} & \mathrm{C}_{x_o y_o} & \mathrm{C}_{x_o \theta_o} & \mathrm{C}_{x_o x_e} & \mathrm{C}_{x_o y_e} \\ \mathrm{C}_{y_o x_o} & \mathrm{C}_{y_o y_o} & \mathrm{C}_{y_o \theta_o} & \mathrm{C}_{y_o x_e} & \mathrm{C}_{y_o y_e} \\ \mathrm{C}_{\theta_o x_o} & \mathrm{C}_{\theta_o y_o} & \mathrm{C}_{\theta_o \theta_o} & \mathrm{C}_{\theta_o x_e} & \mathrm{C}_{\theta_o y_e} \\ \mathrm{C}_{x_e x_o} & \mathrm{C}_{x_e y_o} & \mathrm{C}_{x_e \theta_o} & \mathrm{C}_{x_e x_e} & \mathrm{C}_{x_e y_e} \\ \mathrm{C}_{y_e x_o} & \mathrm{C}_{y_e y_o} & \mathrm{C}_{y_e \theta_o} & \mathrm{C}_{y_e x_e} & \mathrm{C}_{y_e y_e} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$H_2 = \mathrm{C}_{x_o}\dot{x}_o + \mathrm{C}_{y_o}\dot{y}_o + \mathrm{C}_{\theta_o}\dot{\theta}_o + \mathrm{C}_{x_e}\dot{x}_e + \mathrm{C}_{y_e}\dot{y}_e \tag{23}$$

を定義する．ただし α は任意定数である．$\boldsymbol{x}_{ei}$ 点の重量を m_e, 物体の慣性モーメントを I_o とするとき定数 λ を用いて，

$$\begin{bmatrix} m_o & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{C}_{x_o} \\ 0 & m_o & 0 & 0 & 0 & \mathrm{C}_{y_o} \\ 0 & 0 & I_o & 0 & 0 & \mathrm{C}_{\theta_o} \\ 0 & 0 & 0 & m_e & 0 & \mathrm{C}_{x_e} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_e & \mathrm{C}_{y_e} \\ \mathrm{C}_{x_o} & \mathrm{C}_{y_o} & \mathrm{C}_{\theta_o} & \mathrm{C}_{x_e} & \mathrm{C}_{y_e} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_i \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_o g \\ 0 \\ 0 \\ -m_e g \\ \mathrm{C} \end{bmatrix} \tag{24}$$

のように標準形式で運動方程式を記述できる．

3.0.2　実行結果

シミュレーションを実行した際の物体の運動のスナップショットを Fig.9 に示す．シミュレーションには Table 1 のパラメータを用いた．ただし，物体の形状は

Table 1: Parameters for dynamic binding simulation with constraint stabilization method (CSM).

Object	object shape	a	1	[-]
	object shape	b	1	[-]
	object shape	w	1	[-]
	mass	m_o	10	[kg]
	inertia	I_o	1	[m]
Thread	virtual mass of $\boldsymbol{x}_{e1}$	m_{e1}	0.1	[kg]
	virtual mass of $\boldsymbol{x}_{e2}$	m_{e2}	0.1	[kg]
	elastic modulus	k	500	[N/m]
CSM	CSM parameter	α	2000	[-]

$$\frac{x^2}{a^2} + (-1)^w \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0 \tag{25}$$

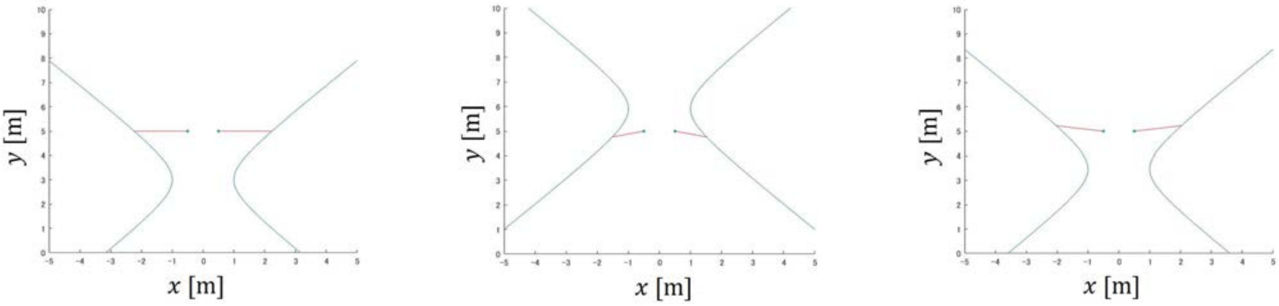
で与えた．

$\boldsymbol{x}_{ci}$ 点が物体側面を離れずに，糸が伸縮しながら物体が上下する動作が得られた．また，y 軸方向の物体位置の時間変化を Fig.10 に示す．単振動に類似した運動が観察できた．

3.0.3　考察

シミュレーションでは，物体位置が発散することなく周期運動を繰り返している．このとき，物体位置は落下などにより発散することなく一定の範囲に留まっている．このように，摩擦なしのすくいあげバインディングにより物体を不動化することはできていないが，物体をある領域に留めるような拘束を与えることができると考えられる．

一方で摩擦を考慮していないため，レンチベクトルの平衡が非常に困難である．Fig.11 に示すように，時間経過とともに物体姿勢が徐々に傾斜する様子が観察できた．しかし，実機ですくいあげバインディング実験を行う際には糸と物体側面の間に摩擦が存在しており，その場合においては物体を回転させずにバインディング可能であった．よっ



(a) Initial state (b) Near the top point (c) Near the bottom point

Fig. 9: Snapshots of binding simulation results without friction: with outline of target object (blue line), projected thread (red line), and projected fingers (cyan dots).

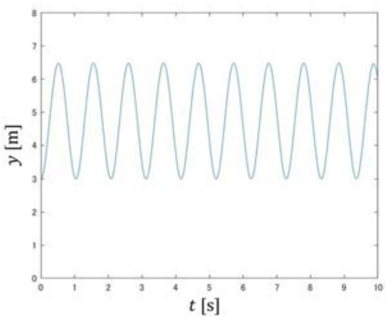


Fig. 10: Oscilation of an object in y-axis direction.

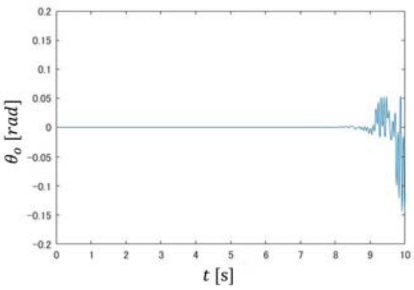


Fig. 11: Object orientation θ_o along time.

て，摩擦によるエネルギ散逸を活用して物体の振動及び傾斜を減少させることや，物体を支える糸の本数を増やしてモーメントを平衡させることが，より確実なバインディングの条件になると考えられる．

4. 結言

本稿では 2 次元のバインディングの十分条件について整理した．また，3 次元空間における立体物のバインディングを，静力学的観点から 3 次元バインディングとすくいあげバインディングに分類した．このうち，物体と糸の間の摩擦を用いない場合のすくいあげバインディングをシミュレーションした．これにより物体位置は発散せず，物体位置がある領域に留まるような性質が確かめられた．一方で，糸と物体の間の摩擦がないモデルでは物体姿勢が時間経過とともに傾斜したことから，バインディングモデルにおける摩擦の重要性が確かめられた．また，弾性膜等の面による物体保持へとバインディングモデルを拡張することで，弾性糸以外の柔軟機構による物体保持にも糸によるバインディングと共通の性質が発見できる可能性がある．今後は摩擦などを含めたバインディングモデルを導出し，各部の形状などに関してバインディングの条件を一般化していく．

参考文献

[1] Daniela Rus, and Michael T. Tolley. ”Design, fabrication and control of soft robots” Nature, vol.521, no. 7553, pp.467-475, May. 2015.

[2] Zhongkui Wang, Yuuki Torigoe, and Shinichi Hirai. ”A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, Issue 4, pp.1909-1916, 10.1109/LRA.2017.2714141, Oct., 2017

[3] Yoshiyuki Kuriyama, Yuusuke Okino, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai: ”A Wrapping Gripper for Packaging Chopped and Granular Food Materials” 2019 IEEE Int. Conf. on Soft Robotics (RoboSoft 2019), COEX, Seoul, Korea, Apr. 14-18, pp.114-119, 2019.

[4] 山中悠太, 遠藤玄, 鈴森康一, 難波江裕之: ”食品の拘束搬送を目的とした面構造を有するソフトロボットハンドの提案” 第 37 回日本ロボット学会学術講演会, 2D1-04, 2019.

[5] Hisashi Iwamasa and Shinichi Hirai, ”Binding of Food Materials with a Tension-Sensitive Elastic Thread” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4298-4303, 10.1109/ICRA.2015.7139792, May. 2015.

[6] Elon Rimon and Andrew Blake. ”Caging 2D Bodies by 1-Parameter Two-Fingered Gripping Systems” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1458-1464, April 1996.