コインスタッカにおける空間ベルト姿勢変換機構の幾何学的解析*

曲 尾 晃 一^{*1}, 中 沢 賢^{*2}
河 村 隆^{*2}, 香 山 格^{*1}Geometric Analysis on Space Belt Mechanism to Change Coin
Attitude in Coin StackerKoichi MAGARIO, Masaru NAKAZAWA,
Takashi KAWAMURA and Itaru KAYAMA

A basic theory of the space belt mechanism that changes coin attitude from horizontal to vertical is proposed. The coin is transferred along the space curve line of the belt being pressed tightly against the curved surface of the solid guide block. The differential equations governing the space belt curve were derived for an arbitrary given guide block surface with arbitrary inlet and outlet positions of the coin. Theoretical analysis proved that the component of inertia force of the belt perpendicular to the belt surface and parallel to the block surface was zero. The theoretical results and those of corresponding experiment for the bending/twisting ruled surface were compared and confirmed the validity of the theory. The analytical method to examine the separation of the belt from the guide surface was also proposed.

Key Words: Dynamics of Machinery, Mechanism, Business Equipment, Design Engineering, Coin Stacker, Attitude Change, Belt Conveyor

1 序論

本研究は、卓上型コインスタッカのコイン姿勢変換機構に使われている空間ベルト姿勢変換機構の、幾何学的・運動学的な解析を目的とするものである。

コインスタッカとは、受け皿に投入されたバラバラの向きのコイン塊から、コインを1枚ずつ分離し、一定の方向に向きを揃えて積み重ねて、一定枚数ずつ紙等で包装する機械である。図1に卓上型のコインスタッカのコイン移送部分を示す。エッジ付きの回転ディッシュ上に落とされたコインは、遠心力で飛ばされることにより水平面上で一枚ずつに分離され、順次コイン加速部で一定速度にまで加速された後、姿勢変換機構に渡される。コインは保持ベルト(タイミングベルト)で姿勢変換ブロック曲面に押しつけられながら、ベルトの摩擦力によりベルトの曲線に沿って搬送される。この間にコインは水平から垂直へと姿勢を変換される。姿勢変換部を出たコインは、順次コイン集積部に送り込まれ、一定枚数になると包装される。

空間ベルト姿勢変換機構は、組立時において、ベルトの張力、ベルト移送の始点と終点の位置、その始点

終点におけるプーリーの曲面への押しつけ力等の選定を誤ると、使用の際コインの逸脱が起りやすくなる。コインの逸脱とは、コインが移送途中でベルトから外れたり、ベルト移送終点から放出される際の位置や方向が不正になりコイン集積部に入らず飛散する現象をいう。現状のコイン移送速度では、経験則に従い調整を行うので、逸脱はほとんど生じない。ただし、調整を行っても、極度に長年月使用すると、ガイド曲面が摩耗したり、コイン材料が曲面に付着したりして、曲面形状が変わり、逸脱が生じやすくなるおそれがある。また、試験的にベルトの走行速度を上げると、逸脱が生じやすくなる。耐久性向上や高能率化のためには、空間ベルト姿勢変換機構の幾何学的・力学的な解析が必要になる。

ところで、これまでのベルト型コンベヤによる搬送物体の姿勢変換の研究では、2本の直線コンベヤを組み合わせた機構における物体の姿勢変化⁽¹⁾⁽²⁾やプーリによりベルト走行方向を上下方向に変える機構⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾等が扱われているが、ベルトに曲げとねじりを同時に与える構造にすることによって、物体を搬送しながら姿勢変換させる機構は、ほとんど扱われていない。そこで、本報においては、まず任意に定めた姿勢変換ブロック曲面上に、移送ベルトの始点と終点を任意に定めた場合について、ベルト空間曲線(コインの走行軌

* 原稿受付 平成6年8月22日。

^{*1} 正員, 上田日本無線(株) (〒386 上田市踏入2-10-19)。^{*2} 正員, 信州大学 (〒386 上田市常田3-15-1)。

図1 コインスタッカ原理図

図2 姿勢変換移送機構

跡)や曲率, ねじれ率の解析に必要な関係式を求める。次に, 実用化されている姿勢変換ブロック曲面に対し, 本理論による数値計算と実験を行い, その特性を検討する。さらに, ベルトがブロック曲面から分離(浮上)する場合に対する, 本理論の適用の方法について検討する。

2 ブロック曲面とベルト曲線に関する理論

2.1 空間ベルト姿勢変換機構におけるベルト曲線

図2に, 空間ベルト姿勢変換機構の基本構造を示す。 P_i 点, P_o 点はそれぞれ, コインの入り口(保持ベルトの始点)および出口(保持ベルトの終点)である。コインはこの2点間に張られたベルトの間を通過する間に, P_i 点の位置と姿勢から P_o 点の位置と姿勢に変換される。ブロック曲面上のコインの軌跡すなわちベルトの形状は, 一般に空間曲線を描き, ベルトやコインの幾何学的運動学的性質は, この曲線に大きく依存する。

ブロック曲面の位置ベクトル表示を $X(u_1, u_2)$, 空間

に取った直交座標成分表示を,

$$x = f_1(u_1, u_2) \quad (1)$$

$$y = f_2(u_1, u_2) \quad (2)$$

$$z = f_3(u_1, u_2) \quad (3)$$

とする。 u_1, u_2 は3次元曲面を表示するための媒介変数で, 3次元曲面上の位置を示す座標と見られることもできる。 P_i 点から P_o 点まで, ベルトを曲面上に弛まないように張ったときの曲線は, P_i 点から P_o 点まで最短距離を与える曲面上の曲線を求めることにより定まる。曲面上で (u_1, u_2) と微小距離離れた $(u_1 + du_1, u_2 + du_2)$ との間の変位ベクトルを dX とすると,

$$dX = \frac{\partial X}{\partial u_1} du_1 + \frac{\partial X}{\partial u_2} du_2 \quad (4)$$

であるから, 2点間の距離 ds は, 上式より次式のようにになる(図2参照)。

$$ds = \sqrt{dX \cdot dX} = \sqrt{\sum_{i,j=1}^2 g_{ij} du_i du_j} \quad (5)$$

ただし,

$$g_{11} = \frac{\partial X}{\partial u_1} \cdot \frac{\partial X}{\partial u_1} = \left(\frac{\partial x}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u_1}\right)^2 \quad (6)$$

$$g_{12} = g_{21} = \frac{\partial X}{\partial u_1} \cdot \frac{\partial X}{\partial u_2} = \left(\frac{\partial x}{\partial u_1}\right) \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial u_2}\right) + \left(\frac{\partial y}{\partial u_1}\right) \cdot \left(\frac{\partial y}{\partial u_2}\right) + \left(\frac{\partial z}{\partial u_1}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial u_2}\right) \quad (7)$$

$$g_{22} = \frac{\partial X}{\partial u_2} \cdot \frac{\partial X}{\partial u_2} = \left(\frac{\partial x}{\partial u_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u_2}\right)^2 \quad (8)$$

ベルト上に取った曲線座標 s の P_i 点の値を 0, P_o 点における値を s_0 とすると, P_i 点から P_o 点まで s に沿った曲面上のベルト長さ L は, 次式により与えられる。

$$L = \int_0^{s_0} \sqrt{\sum_{i,j=1}^2 g_{ij} du_i du_j} \quad (9)$$

この L が極小になる条件を変分法により求め, 整理すると次の4元連立1階常微分方程式を得る。

$$\frac{du_1}{ds} = u_3 \quad (10)$$

$$\frac{du_2}{ds} = u_4 \quad (11)$$

$$\frac{du_3}{ds} = F_1 \quad (12)$$

$$\frac{du_4}{ds} = F_2 \quad (13)$$

図3 ベルトの曲げとねじれ

ここで, u_3, u_4 は式 (10), (11) で定義される関数で, 曲面上における s が u_1, u_2 それぞれの方向となす角を示す方向係数である. F_1, F_2 は次式で与えられる.

$$F_1 = -a_{11}u_3^2 - 2a_{12}u_3u_4 - a_{22}u_4^2 \quad (14)$$

$$F_2 = -b_{11}u_3^2 - 2b_{12}u_3u_4 - b_{22}u_4^2 \quad (15)$$

ただし,

$$a_{11} = \frac{1}{2g} \left\{ g_{22} \left(\frac{\partial g_{11}}{\partial u_1} \right) - g_{12} \left(2 \frac{\partial g_{12}}{\partial u_1} - \frac{\partial g_{11}}{\partial u_2} \right) \right\} \quad (16)$$

$$a_{12} = \frac{1}{2g} \left\{ g_{22} \left(\frac{\partial g_{11}}{\partial u_2} \right) - g_{12} \left(\frac{\partial g_{22}}{\partial u_1} \right) \right\} \quad (17)$$

$$a_{22} = \frac{1}{2g} \left\{ g_{22} \left(2 \frac{\partial g_{12}}{\partial u_2} - \frac{\partial g_{22}}{\partial u_1} \right) - g_{12} \left(\frac{\partial g_{22}}{\partial u_2} \right) \right\} \quad (18)$$

$$b_{11} = \frac{1}{2g} \left\{ -g_{12} \left(\frac{\partial g_{11}}{\partial u_1} \right) + g_{11} \left(2 \frac{\partial g_{12}}{\partial u_1} - \frac{\partial g_{11}}{\partial u_2} \right) \right\} \quad (19)$$

$$b_{12} = \frac{1}{2g} \left\{ -g_{12} \left(\frac{\partial g_{11}}{\partial u_2} \right) + g_{11} \left(\frac{\partial g_{22}}{\partial u_1} \right) \right\} \quad (20)$$

$$b_{22} = \frac{1}{2g} \left\{ -g_{12} \left(2 \frac{\partial g_{12}}{\partial u_2} - \frac{\partial g_{22}}{\partial u_1} \right) + g_{11} \left(\frac{\partial g_{22}}{\partial u_2} \right) \right\} \quad (21)$$

$$g = g_{11}g_{22} - g_{12}^2 \quad (22)$$

曲面が式 (1), (2), (3) により与えられると, 式 (16) ~ (22) により, 式 (14), (15) の右辺が定まるので, 式 (10) ~ (13) を u_1, u_2, u_3, u_4 につき s の関数として解けば, ベルト曲線が曲面上の座標の関数として求められる. 曲面を表す式 (1), (2), (3) に, $u_1(s), u_2(s)$ を代入すれば, ベルト曲線の空間座標による表示が得られる.

2.2 ベルト曲線の曲率とねじれ率

2.2.1 曲率

ベルト曲線の方程式を $X(s)$ とし, s に関する微分を $\dot{X}(s)$ で表すと, $\dot{X}(s)$ は曲線の接線方向の単位ベクトルとなる.

図3はベルト曲線の曲がりやねじれの様子の説明図である. いま, 図3(b)のように, $\dot{X}(s)$ と $\dot{X}(s+\Delta s)$

のなす角を $\Delta\theta$ とし, 後の解析の便宜のため, 符号付き曲率 κ を次のように定義する.

$$\kappa = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} \quad (23)$$

符号は曲率ベクトル $\ddot{X}(s)$ が曲面からブロック内部に向いているときを負, 空間を向いているときを正とする.

κ の大きさについては, 一般に微分幾何学により次式が知られている⁽⁶⁾.

$$|\kappa| = |\ddot{X}(s)| \quad (24)$$

したがって,

$$\begin{aligned} |\kappa| &= \sqrt{\ddot{X}(s) \cdot \ddot{X}(s)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{d^2x}{ds^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2y}{ds^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2z}{ds^2} \right)^2} \end{aligned} \quad (25)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{ds^2} &= \frac{\partial^2 x}{\partial u_1^2} u_3^2 + 2 \frac{\partial^2 x}{\partial u_1 \partial u_2} u_3 u_4 + \frac{\partial^2 x}{\partial u_2^2} u_4^2 \\ &\quad + \frac{\partial x}{\partial u_1} \frac{du_3}{ds} + \frac{\partial x}{\partial u_2} \frac{du_4}{ds} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{ds^2} &= \frac{\partial^2 y}{\partial u_1^2} u_3^2 + 2 \frac{\partial^2 y}{\partial u_1 \partial u_2} u_3 u_4 + \frac{\partial^2 y}{\partial u_2^2} u_4^2 \\ &\quad + \frac{\partial y}{\partial u_1} \frac{du_3}{ds} + \frac{\partial y}{\partial u_2} \frac{du_4}{ds} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2z}{ds^2} &= \frac{\partial^2 z}{\partial u_1^2} u_3^2 + 2 \frac{\partial^2 z}{\partial u_1 \partial u_2} u_3 u_4 + \frac{\partial^2 z}{\partial u_2^2} u_4^2 \\ &\quad + \frac{\partial z}{\partial u_1} \frac{du_3}{ds} + \frac{\partial z}{\partial u_2} \frac{du_4}{ds} \end{aligned} \quad (28)$$

曲面 $X(u_1, u_2)$ と, その上のベルト曲線 $u_1(s), u_2(s)$ が与えられれば, 式 (26), (27), (28) の右辺は既知となるから, 式 (25) により曲率の大きさが求められる.

2.2.2 ねじれ率

ベルトの幾何学的特性にとって, 曲げとともに重要な因子は, ねじれである. 図3において, Δs に対するねじれを $\Delta\phi$ として, ねじれ率 τ を次式で定義する.

$$\tau = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta\phi}{\Delta s} \right| \quad (29)$$

上式の右辺は $\dot{X}(s)$ と $\ddot{X}(s)$ の定める平面に垂直な方向の単位ベクトル $\xi_3(s)$ ($= \frac{\dot{X}(s) \times \ddot{X}(s)}{\kappa}$) の s に対する変化率 $|\dot{\xi}_3(s)|$ に等しくなり, 次式で与えられる⁽⁶⁾.

$$\tau = \left| \frac{\dot{X}(s) \cdot \ddot{X}(s) \cdot \ddot{X}(s)}{\kappa^2} \right| \quad (30)$$

(a) 曲線の曲率ベクトルと 曲面の法線ベクトル
(b) ベルト側方分力

図4 ベルトの圧力の方向とブロック曲面の反力の方向

2.2.3 ベルトが曲面に及ぼす力

図4に示す姿勢変換ブロックの曲面 $X(u_1, u_2)$ 上の任意の曲線 $X(s)$ 上の任意点 p において、曲率ベクトル $\ddot{X}(s)$ を、曲面の同点における接平面 Q の単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ と、 u_1, u_2 方向の単位接線ベクトル $\frac{\partial X}{\partial u_1}, \frac{\partial X}{\partial u_2}$ を使って表すと、次式のようになる⁽⁶⁾。

$$\ddot{X}(s) = a_1 \frac{\partial X}{\partial u_1} + a_2 \frac{\partial X}{\partial u_2} + b\mathbf{n} \quad (31)$$

ただし、

$$b = \sum_{i,j=1}^2 H_{ij} \frac{du_i}{ds} \frac{du_j}{ds} \quad (32)$$

$$H_{ij} = \left| \frac{\partial^2 X}{\partial u_i \partial u_j} \cdot \frac{\partial X}{\partial u_1} \cdot \frac{\partial X}{\partial u_2} \right| \frac{1}{\sqrt{g}} \quad (33)$$

$$a_1 = \frac{du_3}{ds} - F_1 \quad (34)$$

$$a_2 = \frac{du_4}{ds} - F_2 \quad (35)$$

ここで、曲線 $X(s)$ を張力をかけて張ったベルト曲線とするならば、式(12)、(13)を満足するから、 $a_1 = a_2 = 0$ となり、式(31)は

$$\ddot{X}(s) = b\mathbf{n} \quad (36)$$

となる。上式は、ベルト曲線に沿うすべての点において、ベルトがコインとベルトを押す力の方向と、それを受けとめるブロック曲面の反力の方向が一致することを示している。図4(b)に示すように、 $\mathbf{n}$ の方向と $\ddot{X}(s)$ の方向がずれると、コインおよびベルトにはブロック曲面表面に沿うベルトの側方向の力成分が生じるが、ベルトが曲面上の最短曲線となる本変換機構では両者が一致するから、それが生じない。したがって、空間ベルト姿勢変換機構にはベルトが長くても、原理上コインやベルト曲線が曲面上でベルトの側方向にずれないという利点がある。

ベルトが側方向成分を持たないので、それがブロック曲面を押す力は、図5のようにベルト縦断面で考え

図5 ベルトが及ぼす圧力

れば十分である。曲率 κ の部分においては、ベルトの幅を w 、張力を T とすると、ベルトとブロックの間の圧力は $p = \frac{\kappa T}{w}$ となる。この値が大きいほど、ベルトの摩擦力によるコインの把持力は大きくなる。

2.2.4 慣性力

コインあるいはベルトの慣性力は、注目する部分の質量を m とすると、次式のようになる。

$$F = -m \frac{d^2 X}{dt^2} = -m \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 \cdot \ddot{X}(s) - m \frac{dX}{ds} \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (37)$$

ここで、 t は時間である。空間ベルト姿勢変換機構では式(36)が成立するので、上式は次のようになる。

$$F = -m \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 \cdot b\mathbf{n} - m \frac{dX}{ds} \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (38)$$

上式右辺は、曲面上を走行するコインおよびベルトには、慣性力の曲面上のベルト側方向成分が生じないことを示している。したがって、本機構ではベルト速度がいかに大きくなっても、原理上はベルトからコインを逸脱させる方向の力が働かないことが分かる。

3 数値計算および実験

3.1 曲げねじれ線織曲面

本章では、実用化されている具体的なブロック曲面と、これに対する前章の理論の数値計算法と、対応する実験方法について述べる。ここで取り上げるブロック曲面を図6に示す。ブロックは xy 平面を水平面にして使うものとし、 ab がコインの入り口位置、 cd が出口位置とする。ブロック曲面の幅を ℓ 、搬送水平距離を y_0 とする。途中の曲面形状は幅方向には直線とし、直線の水平面との傾斜角 ψ は、入り口から出口まで y 座標に比例して 0 から $\frac{\pi}{2}$ まで増加するものとする。本報では、この曲面を曲げねじれ線織曲面と呼ぶ。入り口から出口まで、曲面の幅の中心を通る曲線に沿って s_1 から s_2 まで曲面座標 u_1 、この曲線に垂直に座標 u_2 を設定する。ただし、 u_2 座標の原点は s_1-s_0 曲線上に取り、上方を正とする。このとき、式(1)、(2)、(3)の具体的な形は次のようになる。

図6 曲げねじれ線織曲面

$$x = \left(\frac{\ell}{2} - u_2\right) \cos au_1 \quad (39)$$

$$y = \frac{a}{k} u_1 \quad (40)$$

$$z = \left(\frac{\ell}{2} + u_2\right) \sin au_1 \quad (41)$$

ただし,

$$k = \frac{\pi}{2y_0} \quad (42)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^2 + \left(\frac{\ell}{2}\right)^2}} \quad (43)$$

3.2 数値計算法

式(10)～(13)に対する数値解を,ここではルンゲクッタ法により求める. u_1, u_2, u_3, u_4 それぞれの $s=0$ における値(初期値)を適当に選び,それに対する解 $u_1(s), u_2(s), u_3(s), u_4(s)$ を求めれば,ベルト曲線が定まる.

3.3 実験によるベルト曲線の測定法

図7に計算の妥当性を検討する実験を行うためのベルト曲線の測定装置の原理を示す.測定精度を上げるため,ブロック曲面ベルト入り口から出口にかけては,ベルトの代わりに糸を張った.直交座標軸 xyz を図6と同様に取り, yz 平面に垂直にビデオカメラをセットした.また,図のように yz 平面から45度傾いた面に鏡を設置することにより, yz 平面への投影画像と yx 平面への投影画像を同時に撮影できるようにした.なお,測定に先立ち,実際の機械にセットされたベルトの走行中の曲線と,本実験のようにベルトの始点から終点の位置にかけて糸を貼付した曲線が,ほとんど一致することを確かめている.

4 計算および実験結果と検討

4.1 ベルト曲線

$\ell = 36\text{mm}, y_0 = 150\text{mm}$ なるブロック曲面について,曲面上のベルト位置を式(10)～(13)より求めた結果

図7 ベルト曲線の測定法

図8 ベルト曲線の曲面上での形状

を図8に示す.図中のパラメータ α は $s=0$ の点における u_1 軸とベルトを張る方向のなす角度(偏角)を表している.実際にベルトを張るときには,図の左端の入り口の位置と右端の出口の位置を指定するが,数値計算では初期値として入り口の位置 $u_1(0), u_2(0)$ と方向 $u_3(0), u_4(0)$ を指定して解を求めることになる.図を見ると,偏角の初期値が0の曲線が,必ずしも幅の中心を通るわけではないことが分かる.

図9にベルトの始点終点を図示のような値にとった場合の曲線の yx, yz 平面それぞれへの投影を示す.実線は計算値,丸印は実験値を示す. u_{20} はベルト始点における横方向座標値, u_{2F} は終点における横方向座標値である.実験値および理論値はかなりよく一致している.

図10は $u_{20} = -15, u_{2F} = 10$ の場合である.この場合には理論値と実験値がずれているが,これは実験では2点間の最短距離として糸が曲面から分離して空間を通ることを許しているのに対し,理論では2点間の曲面内での最短曲線を求めているためである.

4.2 ベルトの曲率曲線とベルトの分離

ベルトが曲面から分離しない場合の例として, $u_{20} = 5, u_{2F} = 0$, 分離する場合の例として, $u_{20} = -15, u_{2F} = 10$ を取り上げ,符号付き曲率を計算した結果を図11(a),(b)に示す.(a)では曲率は負,(b)では正になり,曲率が負なら曲面は上に凸ゆえベルトは曲面に

(a) x 成分

(b) z 成分

図9 ベルト曲線の空間座標表示 (ベルトが曲面に接触する場合)

(a) x 成分

(b) z 成分

図10 ベルト曲線の空間座標表示 (ベルトが曲面から分離する場合)

(a) ベルトが曲面に接触する場合

(b) ベルトが曲面から分離する場合

図11 ベルト曲線の曲率

接触し、正なら曲面は上に凹ゆえ分離することを示していると考えられる。ベルトが曲面を圧する力は、曲率 κ に比例するので、図11(a)において、始点終点近くではベルトの拘束力が小さくなることが考えられる。実際の機械では、図2に示す始点終点のプーリーの軸と曲面の間の距離を加減して、ベルトがその付近の曲面を押す力を追加調整している。

図11は曲率の符号がベルトの始点から終点まで変わらない場合であるが、これに対しベルトの部分により変わる場合につき、数値計算を行った結果を図12に示す。 u_{20} を-5に固定して、 u_{2F} を-5, 0, 5, 10と順次変えている。 u_{2F} が大きくなるにつれて両端から曲率が正の方に大きくなっていく。図中の実線はベルトが分離しない部分を、破線は分離する部分を実験によって求め、それぞれ記入したものである。大まかには曲率がベルトと曲面の分離と接触の目安になることが分かる。ただし、 $u_{2F} = 10$ では曲率が負でも、実際には分離しており、 $u_{2F} = 5$ でも一部曲率が負でもベルトが分離する部分が存在している。

4.3 接触平面曲線による検討

式(23)より、

$$\theta(s) = \int d\theta = \int_0^s \kappa(s) ds \quad (44)$$

とすれば、数値計算により s に対する θ の変化の様相を知ることができる。 xy 平面上に ξ 軸を取りこれに

図 12 曲線上で符号が変わる曲率

垂直に η 軸を取ると,

$$\xi = \int_0^s \cos \theta(s) ds \quad (45)$$

$$\eta = \int_0^s \sin \theta(s) ds \quad (46)$$

式 (39) ~ (43) で与えられる曲面に対し, $\kappa(s)$ を求め, 式 (44) ~ (46) より得られた $\xi\eta$ 平面上の曲線を図 13 に実線で示す.

この曲線は, ブロックの曲面の与えられた 2 点を結ぶ曲面上の最短曲線に対して $\tau(s) \equiv 0$ なる変換を行った平面曲線と見ることができる. ベルトの分離に関係するのは $\kappa(s)$ であり, $\tau(s)$ はベルトに回転を与えるだけなので, 分離現象に原理的には関係しない. したがって, 分離現象を設計の段階でチェックするには本曲線による解析が有効である. ここではこの曲線を接触平面曲線と呼ぶことにする. 図の曲線より下方はブロック, 上方は空間となる. 破線は接触平面曲線に対し空間を通過した方が短くなる部分を画いたものである. 図 13 (a) では, 曲面はいたるところで上に凸ゆえこの曲線上に糸をおいて始点終点で張力を加えても糸はブロック表面の最短曲線から分離しない. これに対し, (b) では曲面が凹であるので糸が分離すると考えられる.

図 12 によれば $u_{20} = -5$, $u_{2F} = 10$ の場合には, $\kappa(s)$ が負の部分があるにもかかわらず, 糸が全域で分離する. これは図 13 (c) よりわかるとおり, 始点終点を結ぶ直線より曲面全体が下になる場合は凸部があっても全域で接触しない場合が生じ得るためである. 図 12 で, $u_{20} = -5$, $u_{2F} = 5$ の場合には計算による曲率の符号の正負と, 実験によるベルトと曲面の分離, 接触がずれる部分があるが, (d) を見るとその理由が分かる. 図 (d) の曲線を見ると, 接触は $\xi = 50 \sim 115 \text{ mm}$ の間で起こっており, 図 12 における実験結果とほぼ一致する.

本解析より, 曲げねじれ線織曲面の場合には, 図 6 において, コインの入り口が ab 線上で中央より左寄り, 出口が cd 線上で中央より右寄りになるほど, ベルトの分離が生じ易くなることが分かる.

(a) 曲線上の曲面が全域で上に凸の場合

(b) 曲面が全域で凹の場合

(c) 曲面が凸と凹の部分を含む場合 (1)

(d) 曲面が凸と凹の部分を含む場合 (2)

図 13 接触平面曲線

5 結論

- (1) 滑らかな曲面の2点にベルトを張り、ベルトと曲面の間で物体を空間曲線に沿って搬送する空間ベルト姿勢変換機構におけるベルトの空間曲線の形状、曲率等を解析する基礎式を求めた。
- (2) 得られた理論式より、原理的に、本機構ではベルトがコインを押す力は、常に曲面に垂直でベルト側方向の成分を持たないこと、またコインに働く慣性力も接触面上でベルトの側方向成分（コインがベルトから側方に逸脱しようとする力）を持たないことが分かった。
- (3) 数値計算と実験により、提案した理論の妥当性を検証すると共に、ブロック曲面として曲げねじれ線織曲面を取り上げ、その特性を調べ考察を加えた。
- (4) ベルトが曲面から分離する現象に対し、符号つき曲率を曲線上の座標に沿って積分した曲線（接触平面曲線）を画くことにより、分離、接触を検討する手法を提案し、実験と数値計算によりその有効性を示した。

参考文献

- (1) Thormann, D., Moehle, B., Foerdern Heben, **34-8** (1984), 602.
- (2) Yeo, S. H., Tadmory, M. J., Foster, K., Hodgson, D., C., Proc. Inst. Mech. Eng., B, **204-4**(1990), 223.
- (3) 南坊博司, 日本鉱業会誌, **102-1184** (1986), 690.
- (4) Krause, F., Hentschel, R., Haase, H., Hebezeuge Foerdermittel, 27-11 (1987), 336.
- (5) 吉田光男, 石田喜平, 自動化技術, **19-7**, (1987), 75.
- (6) 安達忠次, 微分幾何学概説, (1991), 培風館.