

## 低バックラッシュ立体カムの フォロア・セルフアライニング機能

### Self-aligning of the follower of low backlash 3D-cam

安沢 孝太\* , 佐々木 裕之\*\* , 鄭 聖燾\*\*\* , 高橋 隆行\*

Kouta Anzawa\* , Hiroyuki Sasaki\*\* , Seonghee Jeong\*\*\* ,  
Takayuki Takahashi\*

\*福島大学, \*\*鶴岡工業高等専門学校, \*\*\*産業技術総合研究所

\*Fukushima University, \*\*Tsuruoka National College of Technology, \*\*\*Advanced  
Industrial Science and Technology.

キーワード : セルフアライニング (self-aligning) , 低バックラッシュ (low backlash) , 立体カム  
(3D-cam) , 指関節 (finger joint)

連絡先 : 〒960-1296 福島市金谷川1 福島大学 理工学群共生システム理工学類 高橋研究室  
安沢孝太, Tel.: (024)548-5259 , Fax.: (024)548-5259 , E-mail: anzawa@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

## 1. はじめに

筆者らは、5本指を有する人型ロボットハンドの開発<sup>1)</sup>を行っている。ロボットハンドは現在まで、様々な研究開発がなされている。ハンドの研究では、アクチュエータの運動を指の運動へ変換する方法が一つの問題となる。アクチュエータからの運動を伝達、変換する機械要素には、歯車、カム、ベルト、ワイヤなどが用いられている。例えば、MouriらのGifu Hand<sup>2)</sup>やUedaらのNAIST Hand<sup>3)</sup>は、フェイスギアやベベルギアを用いており、ドイツDLRのDLR/HIT Hand<sup>4)</sup>、川淵らのUniversal\_Hand\_02<sup>5)</sup>や山野らの5指ロボットハンド<sup>6)</sup>は、ベルトやワイヤを用いている。それぞれ、バックラッシュを低減するための工夫がなされ

ているが、前者は歯車特有のバックラッシュが発生し、後者はベルトやワイヤ、バネの保守が必要となる。そこで、筆者らは低バックラッシュな立体カムを使用した指関節<sup>7)</sup>を開発した。本論文では、文献<sup>7)</sup>で用いている低バックラッシュ立体カムの設計方法とフォロア・セルフアライニング機能について報告する。次節以降は、2節で指関節の設計方針、3節でカムの設計、4節で本機構の特徴であるフォロア・セルフアライニング機能、5節で試作の検証と評価について述べ、6節でまとめる。

## 2. 指関節の設計方針

指関節の設計方針として

- 1) モータ出力軸の運動方向を90[deg]変換

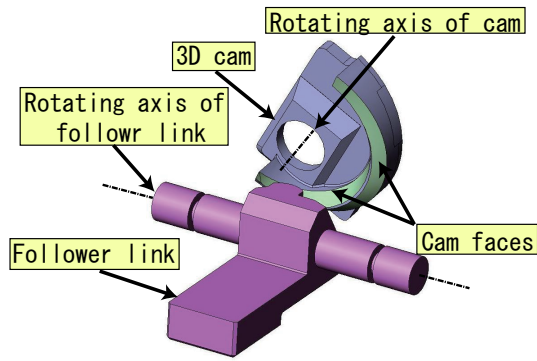


Fig. 1 Developed low-backlash 3D cam.

する .

- 2) モータの入力180[deg]に対して、指関節が100[deg]の出力を得る .
- 3) 低バックラッシュである .

を目標とする .

1)は指の方向にモータを挿入するため、モータの運動方向を指の運動に変換することである . 2)は人間の指関節、特に第二関節はおおよそ100[deg]の回転を行うからである . 3)は関節の制御を行う際に、バックラッシュが発生すると正確な制御を行えないからである . 後述する設計では理論上バックラッシュが発生しないと予想される .

### 3. 低バックラッシュ立体カムの設計

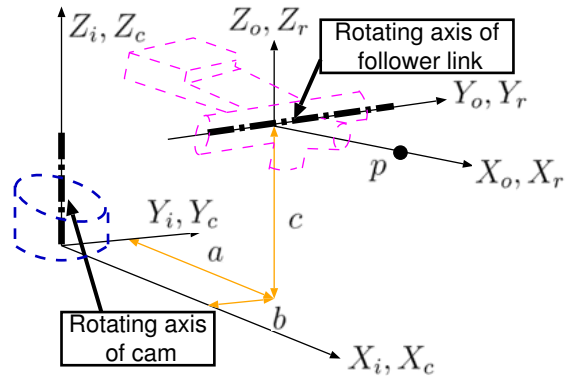
#### 3.1 モデルの構築

Fig. 1に開発する低バックラッシュ立体カム機構の概略図を、Fig. 2に設計を行う際のモデルを示す . Fig. 2(a)はモデルの初期位置を示し、(b)はカムが $\theta_i$ 回転した状態でのモデルを表している . Table 1にはFig. 2に示されているパラメータを示す . Fig. 2に描かれている点

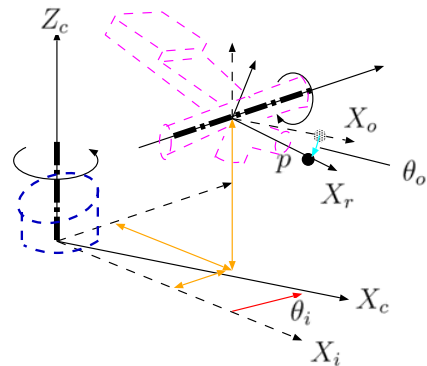
$p$ は $X_r$ 上に存在し、カムが回転すると $X_r$ と共に回転する . なお、出力 $\theta_o$ は

$$\theta_o = \frac{100}{180}\theta_i - 10^\circ \quad (1)$$

と定義する .



(a) Model of initial position



(b) Model for cam angle  $\theta_i$

Fig. 2 Model of cam mechanism.

Table 1 Meaning of symbols on Fig. 2 .

Symbol	Meaning
$p$	A point on $X_r$ .
$a, b, c$	Offset of $X_i, Y_i, Z_i$ .
$\theta_i$	Angle of cam.
$\theta_o$	Angle of follower link.
$X_i, Y_i, Z_i$	Coordinate of input axis.
$X_o, Y_o, Z_o$	Coordinate of output axis.
$X_c, Y_c, Z_c$	Coordinate fixed cam.
$X_r, Y_r, Z_r$	Coordinate rotated from output coordinate.

ここで、Fig. 2をカムから観察したモデル

Table 2 Meaning of symbols on Fig. 3 .

Symbol	Meaning
$d$	Offset from output coordinate.
$l_1, l_2$	Length from the origin of suffix $f$ coordinate to root of the follower.
$w$	Length of follower.
$p_{1in}, p_{1out}, p_{2in}, p_{2out}$	Follower's inner and outer points.
$\alpha$	Angle between two followers.
$X_f, Z_f$	Coordinate fixed follower.

として考える．カムからモデルを観察すると， $i$ 座標系がカムから $-\theta_i$ 回転すると考えられ， $X_r$ 上の点 $p$ は曲線を描くように移動していく．さらに $r$ 座標系についての詳細をFig. 3に示し，Table 2にパラメータを示す．

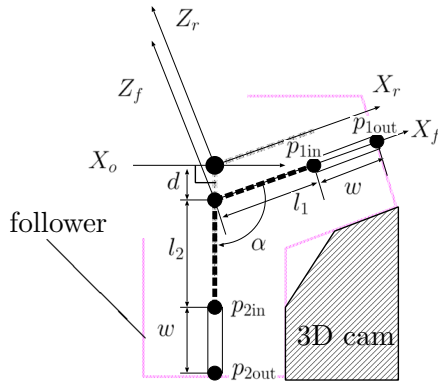


Fig. 3 Detailed model of  $X_r, Z_r$ .

Fig. 3は $Y$ 軸の負方向から観察した $r$ 座標系の図であるが，この位置は本設計でのフォロアの初期位置である．初期位置で $r$ 座標系から $d$ だけ平行移動した座標系を $f$ 座標系としている．ここで， $d$ だけ平行移動しているのは，カムとフォロアの回転の際に，Fig. 3の斜線で示されたカムの一部がフォロア軸と干渉してし

まうことを防止するためである．

Fig. 3に示されている $p_{1in}$   $p_{1out}$   $p_{2in}$   $p_{2out}$ をそれぞれのカム面を構成する4本の曲線とし，この曲線を求めて得たデータを用いてカム面を生成する．

### 3.2 カム面の生成

カム面の生成について述べる．前述したように，カム面の生成には $f$ 座標系に示された4点の軌跡を用いる．これらの点を求めるために，カムから観察した各点の位置を求める．ここで，カムに固定された $c$ 座標系から $f$ 座標系までの同次変換行列を式. (2)に示す．ここで， $\sin \theta_i = S_i$ ， $\cos \theta_i = C_i$ ， $\sin \theta_o = S_o$ ， $\cos \theta_o = C_o$ ， $\sin 10^\circ = S_{10}$ ， $\cos 10^\circ = C_{10}$ としている．

さらに， $f$ 上にある $p_{1in}$ ， $p_{1out}$ ， $p_{2in}$ ， $p_{2out}$ を式. (3)~(6)とする．

$${}^f p_{1in} = \begin{pmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$${}^f p_{1out} = \begin{pmatrix} l_1 + w \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$${}^f p_{2in} = \begin{pmatrix} l_2 \cos \alpha \\ 0 \\ -l_2 \sin \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$${}^f p_{2out} = \begin{pmatrix} (l_2 + w) \cos \alpha \\ 0 \\ -(l_2 + w) \sin \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
{}^c_f T &= {}^c_i T_o^i T_r^o T_f^r T \\
&= \begin{pmatrix} C_i & S_i & 0 & 0 \\ -S_i & C_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_o & 0 & S_o & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_o & 0 & C_o & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -dS_{10} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -dC_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} C_i C_o & S_i & C_i S_o & -dS_{10} C_i C_o - dC_{10} C_i S_o + a C_i + b S_i \\ -S_i C_o & C_i & -S_i S_o & dS_{10} S_i C_o + dC_{10} S_i S_o - a S_i + b C_i \\ -S_o & 0 & C_o & -dS_{10} S_o - dC_{10} C_o + c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)
\end{aligned}$$

式. (2)~(6)から式. (7)~(10)のように $c$ 座標系からの点の位置を求められる.

これらの式から得られた結果を用いて3D CADソフトSolidWorks上でシミュレーションを行った結果をFig. 4に示す. このシミュレーションは, フォロアを中心軸の移動する軌跡を示している. 実際のフォロアはある径を有するため, その径の分のオフセットが必要となる. SolidWorks上でのデータにオフセットを加えたものをFig. 5に示す. オフセットにはSolidWorksのオフセットサーフェス機能を使

用した.

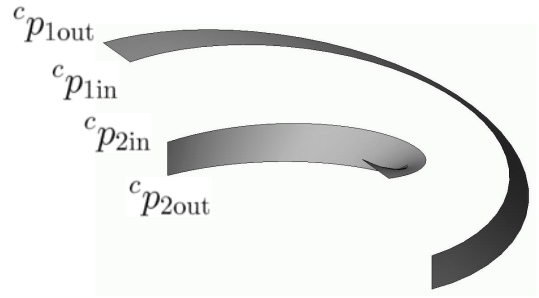


Fig. 4 Data simulation on SolidWorks.

これらの結果から設計を行い, Fig. 1のカム

$${}^c p_{1in} = \begin{pmatrix} (l_1 - dS_{10^\circ})C_i C_o - dC_{10^\circ} C_i S_o + a C_i + b S_i \\ -(l_1 - dS_{10^\circ})S_i C_o + dC_{10^\circ} S_i S_o - a S_i + b C_i \\ -(l_1 - dS_{10^\circ})S_o - dC_{10^\circ} C_o + c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$${}^c p_{1out} = \begin{pmatrix} ((l_1 + w) - dS_{10^\circ})C_i C_o - dC_{10^\circ} C_i S_o + a C_i + b S_i \\ -((l_1 + w) - dS_{10^\circ})S_i C_o + dC_{10^\circ} S_i S_o - a S_i + b C_i \\ -((l_1 + w) - dS_{10^\circ})S_o - dC_{10^\circ} C_o + c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$${}^c p_{2in} = \begin{pmatrix} (l_2 C_\alpha - dS_{10^\circ})C_i C_o + (-l_2 S_\alpha - dC_{10^\circ})C_i S_o + a C_i + b S_i \\ -(l_2 C_\alpha - dS_{10^\circ})S_i C_o - (-l_2 S_\alpha - dC_{10^\circ})S_i S_o - a S_i + b C_i \\ -(l_2 C_\alpha - dS_{10^\circ})S_o + (-l_2 S_\alpha - dC_{10^\circ})C_o + c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$${}^c p_{2out} = \begin{pmatrix} ((l_2 + w) C_\alpha - dS_{10^\circ})C_i C_o + (-l_2 + w) S_\alpha - dC_{10^\circ} C_i S_o + a C_i + b S_i \\ -((l_2 + w) C_\alpha - dS_{10^\circ})S_i C_o - (-l_2 + w) S_\alpha - dC_{10^\circ} S_i S_o - a S_i + b C_i \\ -((l_2 + w) C_\alpha - dS_{10^\circ})S_o + (-l_2 + w) S_\alpha - dC_{10^\circ} C_o + c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

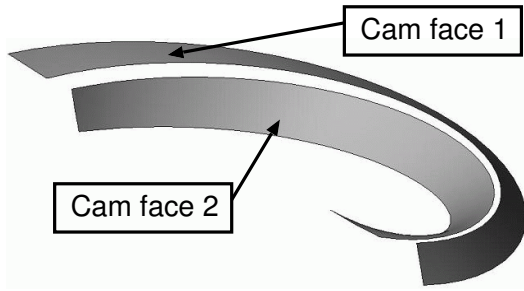


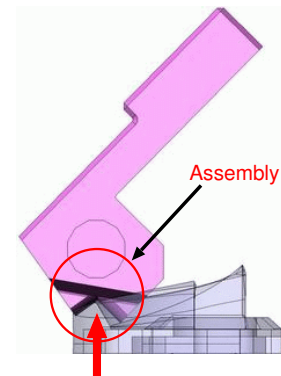
Fig. 5 Offset cam faces on SolidWorks.

機構が得られる．今回のカム設計における各パラメータをTable 3に示す．

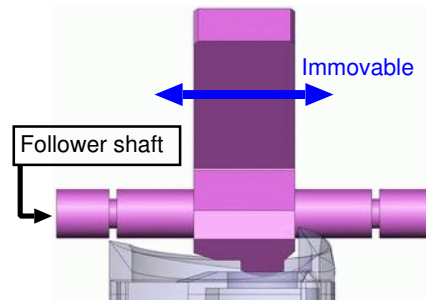
Table 3 Parameter of the cam.		
Parameter	:	Value
$a$	:	5[mm]
$b$	:	0[mm]
$c$	:	6[mm]
$d$	:	0.3[mm]
$l_1$	:	1.4[mm]
$l_2$	:	1.6[mm]
$w$	:	1[mm]
$\alpha$	:	100[deg]
Follower radius	:	1.5[mm]
Follower shaft radius	:	1.25[mm]

#### 4. フォロア・セルフアライニング機能

本立体カム機構の特徴であるフォロア・セルフアライニング機能について述べる．フォロア・セルフアライニング機能とはフォロア軸上をフォロアリンクが自由移動可能，すなわち固定されていなくとも，Fig. 6に示すように(a)立体カムと組み合わせることによって，(b)フォロアリンクのフォロア軸上の移動が拘束される機能である．そのため，Fig. 7の条件を用いている．Fig. 7から次の条件を満たすことで，フォロア・セルフアライニング機能を実現



(a) Assembly with cam



(b) Fixed follower

Fig. 6 Follower self-aligning function.

出来ると考える．

条件1 2つのフォロアがカム面と接触している．

条件2 2つのフォロアとカム面の接触点で，法線ベクトルのフォロア軸方向ベクトルが互いに逆である．

これらの条件を求めるために，Fig. 8に示される各カム面の法線ベクトル $N_m$ を求める．法線ベクトルは

$$N_m = \begin{pmatrix} N_{mx} \\ N_{my} \\ N_{mz} \end{pmatrix} \quad (11)$$

で表す．ここで， $m = 1, 2$ である．以降のベクトルも同じ表現方法を用いる．法線ベクトルは， $p_{1in}, p_{1out}, p_{2in}, p_{2out}$ を $\theta_i$ で微分することで得られる接線ベクトル $T_m$ と，曲面を構成している外側と内側の点それぞれに向かう方

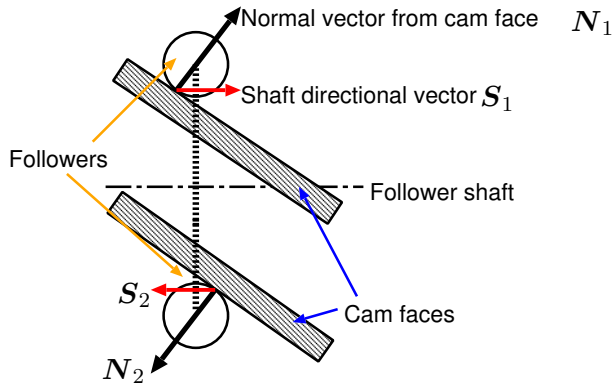


Fig. 7 Principle of self-aligning of the follower.

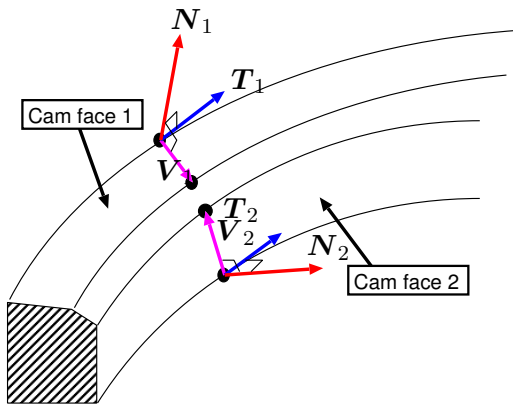


Fig. 8 Normal vector, tangent vector, directional vector on  ${}^c_fP_{1out}$ ,  ${}^c_fP_{2out}$  curves.

向ベクトル  $V_m$  との外積を用いて得られる。ここで、 $\theta_o$  は式 (1) で示されているよう  $\theta_i$  の従属変数なので、各ベクトルは  $\theta_i$  のみの関数となる。なお、各カム面は2本の曲線で示されているので、検証の際には2本の曲線の法線ベクトルの合成ベクトルを用いた。

法線ベクトルのフォロア軸方向のベクトル  $S_m$  を求めるために、Fig. 10 に示すフォロア軸と平行な単位ベクトル

$${}^c_iP = \begin{pmatrix} -\sin \theta_i \\ \cos \theta_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

を考える。  $N_m$  と  $P$  より  $S_m$  を次の様に求める。

$$\begin{aligned} S_m &= |N_m| \cos \beta {}^c_iP \\ &= \frac{N_m \cdot {}^c_iP}{|{}^c_iP|} {}^c_iP \\ &= (N_{mx}P_x + N_{my}P_y) {}^c_iP \quad (13) \end{aligned}$$

前述したフォロア・セルフアライニング機能の条件2を  $-S_1 \cdot S_2$  として評価する。その結果を Fig. 11 に示す。

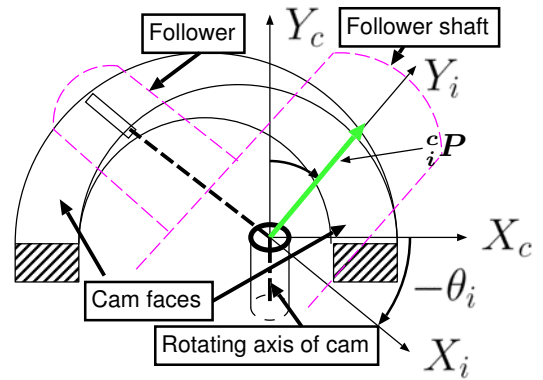


Fig. 9 Unit vector  ${}^c_iP$ .

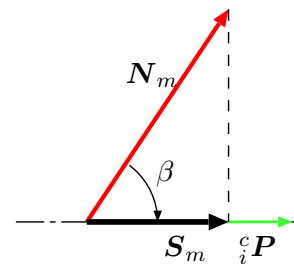


Fig. 10 Directional vector of follower shaft.

2つのフォロアがカム面に接触しており、さらに Fig. 11 よりどのカム角度でも2つの軸方向のベクトルが逆になっているということから、フォロア・セルフアライニング機能はどのカム角度でも効果が現れる可能性がある。

## 5. カムの試作と検証

前節までに求めたパラメータやフォロア・セルフアライニング機能の確認のために実際に

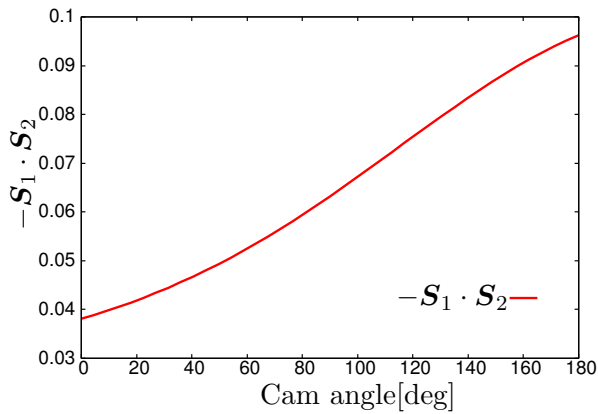


Fig. 11 Effect of self-aligning function.

製作したカムをFig. 12に示す .Fig. 12は指関節として使用する際の4倍の大きさを製作した .

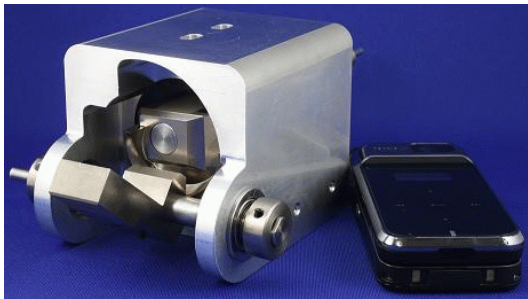


Fig. 12 Fabricated cam.

試作したカムを検証してみると、カムの動作範囲の一部に、比較的大きなバックラッシュ（カム面とフォロア間の隙間が0.1[mm]程度）が見られた。3次元精密測定器でカム面の形状を計測したところ、設計したカムと若干の相違が見られた。このことから、バックラッシュの原因は、製造上の問題ではないかと考えているが、現在、設計面を含めて、さらに詳しい検討を進めている。

このように、カムの動作範囲全域にわたる検証は未達成であるが、比較的バックラッシュの少ないところで検証したところ、フォロアリンクのフォロア軸上の移動が拘束されていることを確認し、フォロア・セルフアライニング機能が有効となる可能性を確認した。

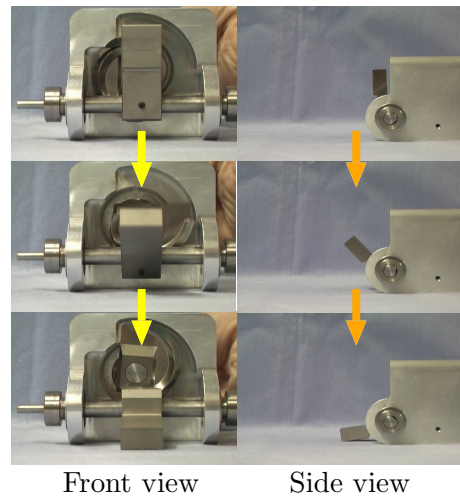


Fig. 13 Movement of cam system.

## 6. おわりに

人型ロボットハンドの指関節に使用する低バックラッシュ立体カムの設計方法とフォロア・セルフアライニング機能について報告した。目標とする運動の変換を行うことが出来たが、本カムの特徴である低バックラッシュやフォロア・セルフアライニング機能の確認までには至らなかった。現状では、フォロアを特定の位置で押しネジなどを使用して固定することで使用可能である。今回のカムを製作する前に、ポリアセタールでの試作を行っていたが、材料によっても動きが異なる。これは弾性要素が関わるためであると推測される。試作したカムの精密測定を行って、バックラッシュ発生の原因を突き止めるとともに、カムの製作工程と設計の両面からの検討を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 佐々木 裕之, 鄭 聖熹, 高橋 隆行: 低バックラッシュ立体カムを用いた5本指ロボットハンド機構設計, 計測自動制御学会東北支部 第240回研究集会, 2007.

- 2) Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Keisuke Yoshikawa, Jun Takai, Satoshi Ito: Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III, ICCA, 1288/1293, 2002.
- 3) Jun Ueda, Yutaka Ishida, Masahiro Kondo, Tsukasa Ogasawara: Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2332/2337, 2005.
- 4) H.Liu, K.Wu, P.Meusel, N.Seitz, G.Hirzinger, M.H.Jin, Y.W.Liu, S.W.Fan, T.Lan, Z.P.Chen: Multisensory Five-Finger Dexterous Hand: The DLR/HIT Hand II, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3692/3697, 2008.
- 5) 川淵 一郎, 星野 聖: 人型ロボットハンドの機構, 電子情報通信学会, 信学技報, ヒューマン情報処理学会「手」研究会, 57/62, 2005.
- 6) 山野 郁男, 前野 隆司: 超音波モータと弾性要素を用いた5指ロボットハンドの開発, 日本ロボット学会誌, 23-8, 977/985, 2005.
- 7) 鄭 聖熹, 佐々木 裕之, 高橋 隆行: 立体カム機構を用いた小型・軽量, 少バックラッシュ指関節の開発, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 講演概要CDROM 3M31, 2007.