

高精度立体カム機構のフォロア軌跡の 包絡線を用いたカム面の導出

Derivation of cam surface of high precision 3D cam mechanism using envelope of follower locus

三浦裕文*, 藤森優太*, 高橋隆行*

Hirofumi Miura*, Yuta Fujimori*, Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード： バックラッシュ(backlash) 内視鏡(endoscope) 立体カム(3D cam) 包絡線(envelope)

連絡先： 〒960-1296 福島県福島市金谷川1 福島大学 理工学群共生システム理工学類 高橋研究室
三浦裕文, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: miura@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 低侵襲な手術法として腹腔鏡下手術が注目されている. しかし, 現在一般的に手術の現場で使用されている腹腔鏡や鉗子は, カメラでの観察やグリッパによる把持を目的とした1自由度の関節を1つ有するものがほとんどである. そのため, 内臓の裏側などの観察・処置が非常に困難であった.

これらの問題を解決するために, 先端に多自由度を有する医療用マニピュレータの研究開発が盛んに行われている¹⁾²⁾. 多自由度を実現する機構は「ワイヤ方式」が広く用いられ, その他には「傘歯車方式」や「リンク方式」などが用いられている.

しかし「ワイヤ方式」の場合, 根元から各関節を介して先端までワイヤで接続されるため, 各関節の独立駆動が困難である. また「傘歯車方式」の場合, 各関節に用いた歯車にバックラッ

シュが発生する. そのため, 関節を直列に接続すると誤差が累積し, 先端の精度が悪化してしまう. 「リンク方式」も「ワイヤ方式」と同様に多関節にした場合, 各関節の独立駆動が困難である.

これらの問題を解決するためには, バックラッシュが小さく, 独立駆動が可能な関節機構が必要である. 筆者らは小型化が可能であり, 高精度な特性を有する立体カム機構や, 同じく高精度な特性を有する変形クラウンギア減速機構の開発を行っている³⁾⁴⁾⁵⁾. 本研究は, それらの機構を用いて, Fig.1に示すような医療用小型多自由度マニピュレータの開発を目標としている. 本研究では腹腔鏡下手術用機器への応用を考えているため, 小径化が必要不可欠となっている. そのため, 現在, 目標を $\phi 5$ [mm]として立体カム機構の小径化を進めている. 本論文では, 高精度立体カム機構の小径化と並行して行っているカム面の設計方法の改善について述べる.

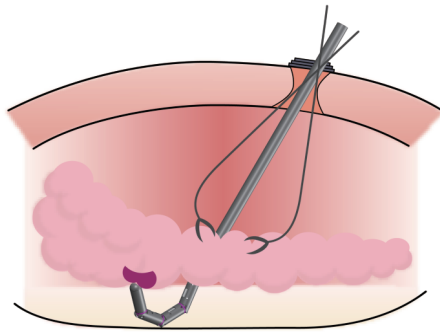


Fig. 1 Laparoscopy with multi degree of freedom manipulator

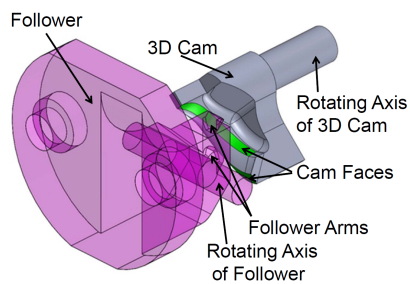


Fig. 2 Basic structure of the 3D cam mechanism

2. 高精度立体カム機構

マニピュレータの関節機構として用いる高精度立体カム機構の概要を Fig.2 に示す．同機構は三次元的に構成された2つのカム面を有するカムと、フォロアから構成されている．Fig.3 に示すように、フォロアはカム面と接するフォロアアームを2つ有している．これらのフォロアアームがカム面と常に2箇所で接触しながら運動するため、理論上のバックラッシュはゼロである．さらに、本機構は歯車のように歯で力を伝達するのではなく、部品全体で力を受けて伝達するため、比較的高い強度を有し、小型化も容易である．また、設計時に入出力の角度関係を定めることができ、可逆動性も備えている．

3. 現行のカム面の問題

現在の立体カム機構には設計値通りにカムとフォロアを配置して動作をおこなった際、フォロ

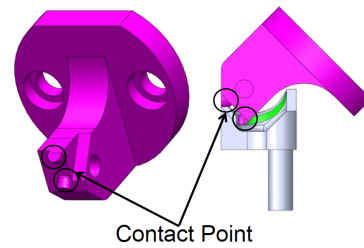


Fig. 3 Detailed structure of the follower of the 3D cam mechanism

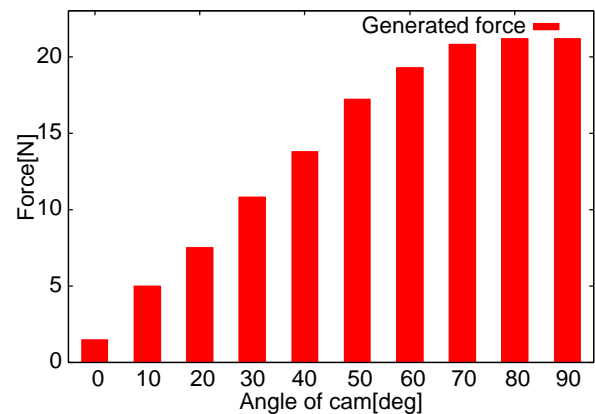


Fig. 4 Generated force

アームにカムを押し付けるように働く力（発生力）が発生してしまっていた．この発生力は Fig.4 に示した通り、カムの回転角度によって変化する．これによってカムの回転角度によって「カムを回転させるときに必要なトルク」が異なるなどの問題が発生する．

これまでこれらの原因は加工精度によるものと考えられていた．しかし、X線CTを用いて精密な計測を行ったところ、Fig.5 に示すようにカム、フォロアともに動作に必要な部分は $10[\mu\text{m}]$ 以内の加工精度で加工できているため、加工精度の問題ではないことがわかった．

そこで、カム面の設計方法自体に問題があると考え、設計法の再検討をおこなった．

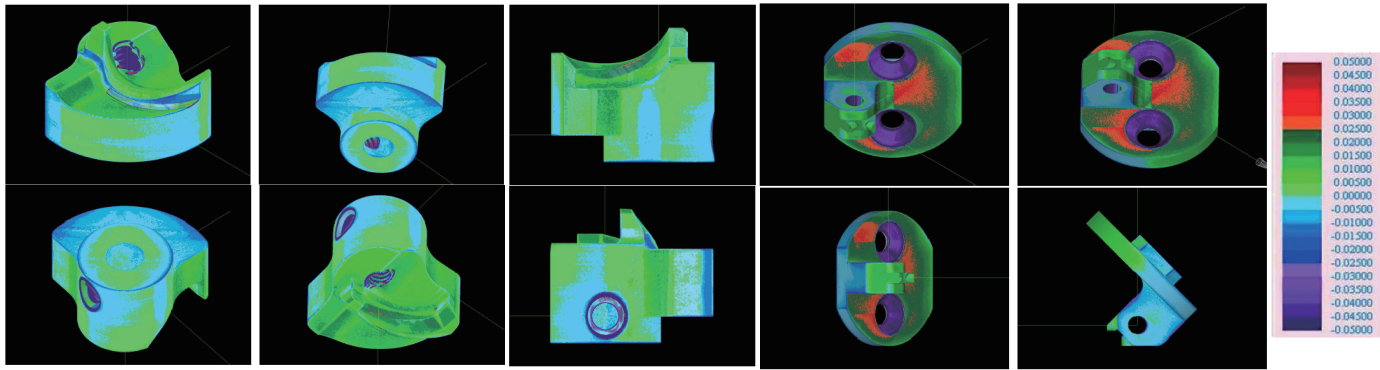


Fig. 5 Accuracy of finishing

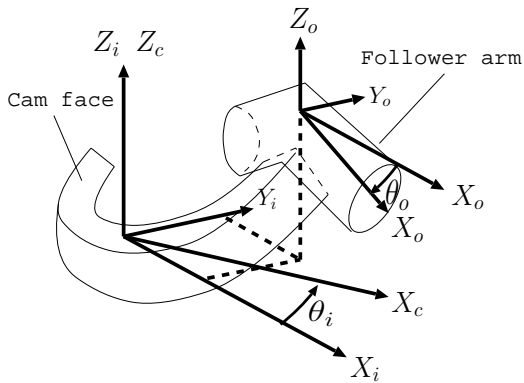


Fig. 6 Assignment of coordinate systems

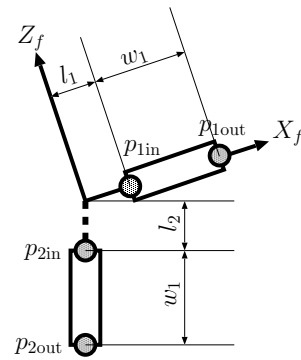


Fig. 7 Position of the representative point of the follower arms

4. カム面の設計方法

本機構のカム面は円筒状のフォロアアームの中心軸の移動軌跡を用いて設計を行う。はじめにフォロアアームの代表点を Fig.7 のように決める。

このフォロアアームの中心軌跡は基準とするカムの座標系から Fig.8 に示すような座標変換を行い、以下に示すような同次変換行列を用いて、3次元上の曲線として求められる。

$${}^cT_p = {}^cT_o {}^oT_r {}^rT_f {}^fT_c p_k \quad (1)$$

$${}^cT = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$${}^iT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

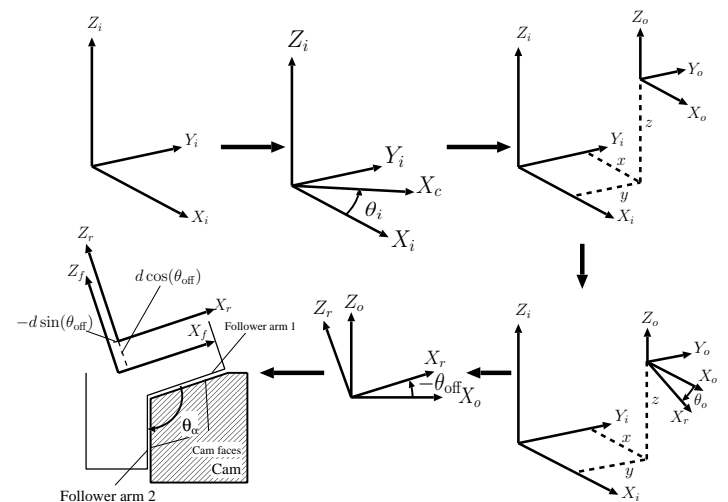


Fig. 8 Method of deriving the homogeneous transformation matrix

$${}^c_iT = \begin{pmatrix} \cos(\theta_o) & 0 & \sin(\theta_o) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_o) & 0 & \cos(\theta_o) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$${}^c_iT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -d \sin(\theta_{\text{off}}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \cos(\theta_{\text{off}}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

そして、以下に示す行列を用いてフォロアアームの代表点とした中心軸の軌跡を求める。

$${}^c p_{1i} = \begin{pmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$${}^c p_{1o} = \begin{pmatrix} l_1 + \omega_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$${}^c p_{2i} = \begin{pmatrix} l_2 \cos(\theta_\alpha) \\ 0 \\ -l_2 \sin(\theta_\alpha) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$${}^c p_{2o} = \begin{pmatrix} (l_2 + \omega_2) \cos(\theta_\alpha) \\ 0 \\ -(l_2 + \omega_2) \sin(\theta_\alpha) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで求められた ${}^c T_p$ はフォロアアームの中心軸の軌跡となるがカム面と実際に接するのはフォロアアームの円筒部である。そのため、中心軌跡からフォロアアームの半径分の距離を押し下げてカム面を設計する必要がある。そこで従来の設計方法では3DCADの機能を使い、導出した軌跡を基に半径分の距離を押し下げ、カム面を設計していた。しかし、この3DCADの面を押し下げる機能はどのようなアルゴリズムで行われているかは不明である。さらに面の押し下げ以外は計算によって導出されているため、3DCADの機能を用いて設計していた面が本機構に最適な面ではないと考え、押し下げる部分も踏まえてカム面を計算で導出することとした。

5. カム面の導出

カム面はカム面に接するフォロアの形状の包絡線になることが知られている。よって、本機構のカム面の両端もフォロアアームの円の包絡線になっていると考えられる。

そこで、フォロアアームの円が傾きながらフォロアアームの中心軌跡に沿って移動する際に描かれる包絡線を求める。まず、先ほど求めた(1)式を以下のように定義する。

$${}^c T_p = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

そして、フォロアアームの中心軌跡を

$$\psi_c(\theta) = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (11)$$

とする。次にフォロアアームの円の法線ベクトルを $\psi_n(\theta)$ とする。ここで条件として $y_0 = 0$, $\theta_{\text{off}} = 0$, $\theta_o = \theta_i = \theta$, $\theta_\alpha = \frac{\pi}{2}$ とする。そして、包絡線を求める式として式(12)を用いた。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \psi_c(\theta) \pm \left(\frac{\frac{d\psi_c(\theta)}{d\theta}}{\left| \frac{d\psi_c(\theta)}{d\theta} \right|} \times \psi_n(\theta) \right) \quad (12)$$

なお、 r はフォロアアームの半径である。この式ではフォロアアームの中心軌跡の接線ベクトルとフォロアアームの法線ベクトルとの外積を取り、中心軌跡の接線ベクトルと直行している単位ベクトルを取る。その単位ベクトルにフォロアアームの半径 r をかけることでフォロアアームの中心軌跡を中心とした円の包絡線を描くことができる。この包絡線を用いて描かれたカム面を Fig.9 に示す。

6. カム面の比較

「従来の方法で設計したカム面」と「包絡線を用いて設計したカム面」を比較した。10度刻

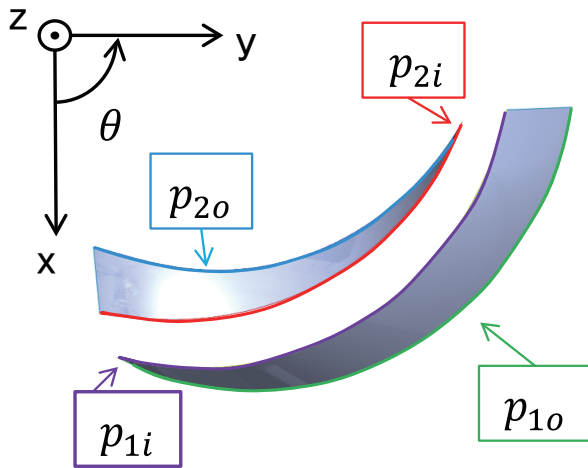


Fig. 9 New cam surfaces

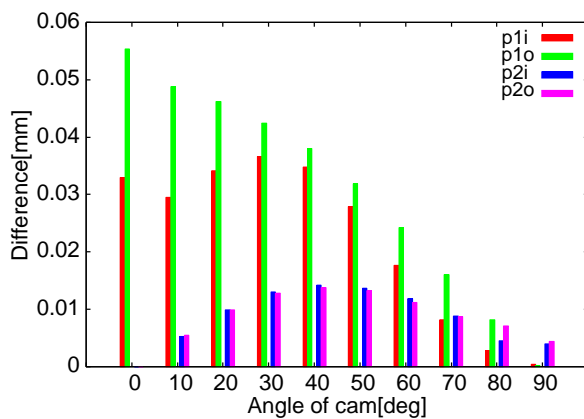


Fig. 10 Difference between new cam surface and old cam surface at certain points

みでそれぞれの座標点の差をスカラー量で求め、Fig.10に示す「包絡線を用いて設計したカム面」の全体の傾向としては3DCADで設計したカム面よりもZ方向に上昇していることがわかった。また、最大で50[μm]動いていることから、従来の設計方法で設計したカム面と異なっていることがわかった。

そこで「従来の設計方法で設計したカム」と「包絡線を用いた設計方法のカム」を比較することとした。「従来の設計方法で設計したカム」を設計値に配置して3DCAD上で動かそうとするとFig.11のようにカム面にフォロアームがめり込んでしまったり、逆にフォロアームがカム面から離れてしまうといった問題があった。

そこで「従来の方法で設計したカム」と「包

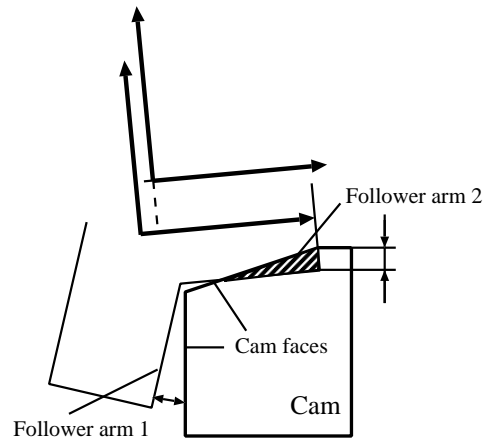


Fig. 11 Error of assembly

絡線を用いた方法で設計したカム」を3DCAD上で組み立て、入力角度と出力角度を設計値に設定し、めり込みの深さや接触しなかったときのカム面からフォロアームまでの距離を比較した。回転角度は10度毎とし、0度から90度まで比較した。比較方法として、フォロアームがカム面にめり込んだときの深さとフォロアームとカム面との距離、並びにその差の絶対値で比較した。本機構のカムにはZ方向を調整する機構を設けているため、差の絶対値の比較はより実際に近い誤差の値になると考えられる。

比較の結果をFig.12とFig.13に示す。Fig.12とFig.13より、「従来の設計方法で設計したカム」より設計値に近いことと80度以外の角度では「包絡線を用いて設計したカム」の絶対値の方が小さいため、より高精度のカム面が生成できるものと期待できることがわかった。これより、包絡線を用いて設計する方法は従来のカムの問題点を解決できる可能性がある。

7. おわりに

本論文では、高精度立体カム機構のカム面の設計の再検討について述べた。包絡線を用いた方法で導出されたカム面は従来の設計方法よりも理論値に近くなっていることとバックラッシュの減少が期待されることから、この設計方法は

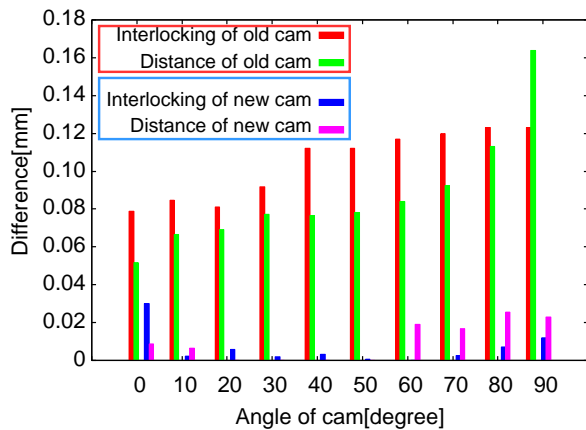


Fig. 12 Difference of theoretical value

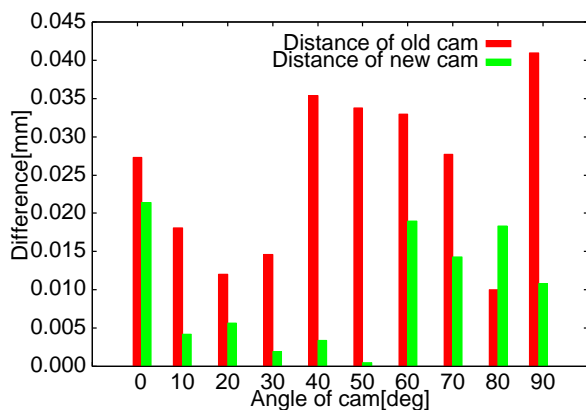


Fig. 13 Comparison of old and new absolute value of difference

従来のカムの問題点を解決できる可能性があることがわかった。

今後は包絡線を用いた方法で設計したカムを実際に製作し、バックラッシュなどの特性の評価を行い、従来の方法で設計されたカムとの性能の比較を行う。

参考文献

- 1) 生田幸士, 東川文博, 緒方 洪: 遠隔腹腔手術用超多自由度関節型能動鉗子の研究, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 99 講演論文集, 1P2-10-005, (1999)
- 2) 藤井雅浩, 福島清暁, 杉田直彦, 石丸哲也, 岩中督, 光石衛: 小児外科手術支援のための極細径多自由度鉗子の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 予稿集 DVD-ROM, 2P1-G20, (2010)
- 3) 安沢孝太, 佐々木裕之, 鄭 聖熹, 高橋隆行: 低バックラッシュ立体カム機構を用いたロボット

ハンドの開発-軽量ロボットハンドの試作と関節機構の評価-, 日本ロボット学会誌 Vol.28, No.7, p115-122 (2010)

- 4) 安沢孝太, 高橋隆行: 低バックラッシュ立体カム機構の平行マニピュレータへの応用, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 予稿集 DVD-ROM, 1A2-G22, (2010)
- 5) Hiroyuki Sasaki, Tomoya Masuyama, and Takahashi Takayuki: Development of a Low Backlash Crown Reducer, IROS2010 Conference DVD Proceedings, TuDin.50, (2010)