

低バックラッシュ立体カム機構を用いた 医療用小型高精度多自由度マニピュレータの開発

Development of small size multi-degree-of-freedom manipulator for medical applications using low backlash high precision 3D cam

○藤森優太*, 安沢孝太*, 佐々木裕之**, 高橋隆行*

○ Yuta Fujimori*, Kota Anzawa*, Hiroyuki Sasaki**, Takayuki Takahashi*

*福島大学, **鶴岡工業高等専門学校

*Fukushima University, **Tsuruoka National College of Technology

キーワード: 低バックラッシュ (low backlash), 立体カム (3D cam), 高精度 (high precision),
医療用マニピュレータ (medical manipulator), 小型 (small size)

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
藤森優太, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: fujimori@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 低侵襲な手術法として単孔式の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, カメラによる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, 高々 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。

このような背景から, 近年先端に多自由度を持たせた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においてよく用いられる方法には, ワイヤ方式と傘歯車方式が挙げられる。しかし, ワイヤ方式は多自由度にした場合, 各関節から根元までワイヤで接続されているため, 各関節の独立駆動が難しい。また, 傘歯車方式は各関節に歯車を使用しているため, 各関節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蓄積し, 先端の精度が悪化してしまう。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。

筆者らは小型化に適した低バックラッシュな関節機構や減速機構の研究を行っている^{3, 4, 5)}。本論文では, これらの機構を各関節に用いた小型で高精度な多自由度マニピュレータについて述べる。

2. メカニズム

まず, 本論文の根幹となる低バックラッシュ立体カム機構, 変形クラウンギア減速機構について述べる。

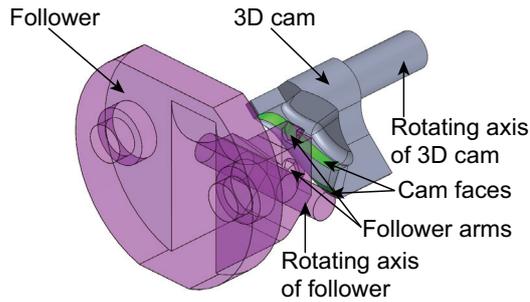


Fig. 1 Basic structure of 3D cam

2.1 低バックラッシュ立体カム機構

マニピュレータの関節機構として用いる、低バックラッシュ立体カム機構について述べる。本立体カム機構の概要を Fig. 1 に示す。同機構は、3次元的に構成された2つのカム面を有するカムと、それら2つのカム面に接するフォロアから構成されている。Fig. 2 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ヶ所で接することで、理論的なバックラッシュは0である。また、同機構ではカムの回転軸とフォロアの回転軸がねじれの位置に配置されているため、フォロアの可動範囲を90deg以上にとることができる。また、フォロアとカム面は線接触となっており、その接触位置はフォロアの回転によって変化する。すなわち、常に同じ位置が接触しないため、摩擦にも比較的強いといった性質も有している。さらに、同機構は部品全体で力を伝達する機構であるため、小型化が容易で、高強度な関節を構成できる。現在までに、直径12mmの関節機構が実現されており、実測でのバックラッシュが0.006deg以下³⁾である。これまで、同機構は「人型ロボットハンド」³⁾の指関節や、「平行マニピュレータ」⁴⁾の駆動関節へ応用されている。

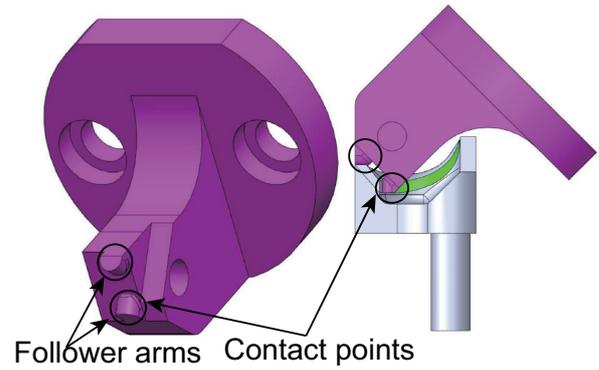


Fig. 2 Contact points between cam and follower

2.2 変形クラウンギア減速機構

減速機として用いる変形クラウンギア減速機構⁵⁾について述べる。同減速機構の概要を Fig. 3 に示す。同機構は歯数の異なる2つのクラウンギアを対向して組み合わせるように構成される。ステータ歯車はケースに固定され、ロータ歯車はバネ性を持ったスポークにより出力軸に接続されている。ロータ歯車は、押し付けロータによりステータ歯車に押し付けられており、入力軸の回転に伴って歳差運動を行う。1周の歳差運動によりロータ歯車は歯数差の分だけ回転するので、ステータ歯車の歯数を N_s 、ロータ歯車の歯数を N とすると、減速比は $N/(N - N_s)$ となる。また、 $N = N_s + 1$ とするか $N_s - 1$ とするかによって、押し付けロータに対するロータ歯車の回転方向を、同方向あるいは逆方向に任意に選択できるというユニークな特徴も有する。

同機構はロータ歯車が最も押し付けられている場所から約±90deg離れたところで常に歯が接触している。そのため理論的なバックラッシュは0となっている。現在の試作では、直径12mmの減速機が実現されている。

3. マニピュレータの構成

本論文で提案するマニピュレータのモデルを Fig. 4 に示す。本マニピュレータは直径13mmの独立4関節4自由度マニピュレータを目標と

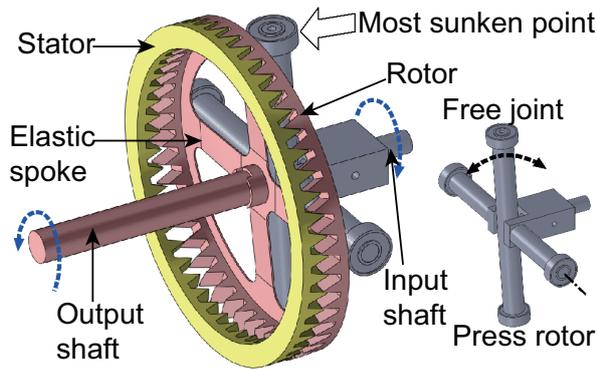


Fig. 3 Basic structure of crown reducer

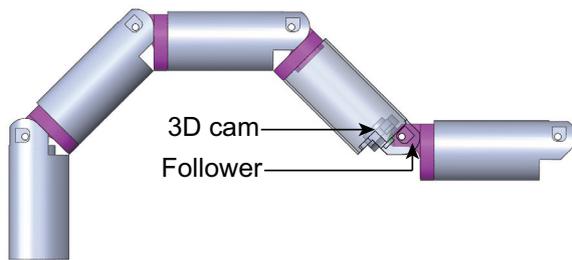


Fig. 4 Model of small size multi-degree-of-freedom manipulator

している。先端部分の1~2節は、先端が狭い腹腔内で自在に動くために減速機を使用せず、長さ方向の削減をはかり、30~40mm程度を目指す。本論文では先端部分の設計・構成について述べる。また、よりトルクの必要とされる根元部分は多少節が長くなってしまいが、「変形クラウンギア減速機構」を使用する予定である。

4. カム機構の設計

本論文で採用するカム機構の設計について述べる。これまでカム機構の設計では精密な強度計算などを行っていなかった。そこで本論文では、有限要素法解析を用いて、カム機構の設計を定量的に行った。

4.1 有限要素法解析

本論文の有限要素法解析には SolidWorksSimulation を用いた⁶⁾。SolidWorksSimulation は 3DCAD ソフトである SolidWorks に標準でア

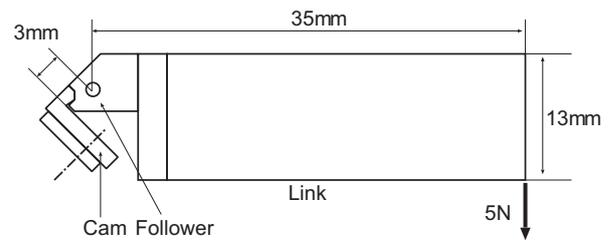


Fig. 5 Size of a link

ドオンされている CAE(Computer Aided Engineering) ツールである。同ツールは構造解析や熱・流体解析，運動学的解析，動力的解析が可能である。今回はこの中の構造解析ツールを用いて、主に応力解析を行った。

4.2 タスクの設定

腹腔鏡や鉗子におけるタスクは、カメラによる病巣の観察や傷口の縫合など多々存在する。その中で最大の力が必要なタスクの基準として、「内臓持ち上げ」が挙げられる。設計を行うにあたり構成部品の破壊を防ぐため、このタスクを設定して強度計算の基準とする。

内臓の持ち上げに必要な力は先行研究によって様々報告されているが、おおよそ 2.5~5N 程度である^{1, 2)}。そこで本論文では、最大の力を 5N と設定した。そこからカム本体にかかる力を、Fig. 5 に示した目標とする各部の寸法を考慮して 60N と設定した。

4.3 解析方法

応力は主にフォロアームとカム面の接触領域に集中すると仮定した。そこで、カムが最も薄くなる部分に 60N の力を加え、最大応力が材料の降伏強さに達しなければ妥当な形状だと判断する。

その条件を満たすまで様々な微調整を行い、その都度解析ツールで解析しながら、適当な形状を探索した。なお、材料には合金鋼を用いた。

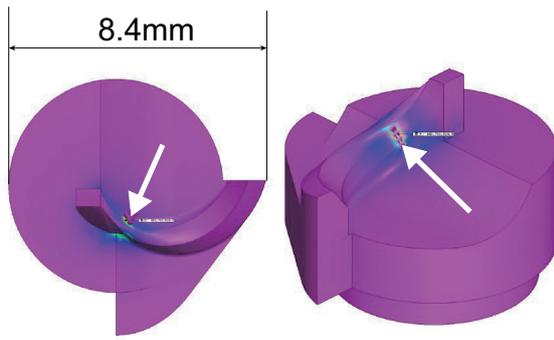


Fig. 6 Analysis of stress distribution of the cam

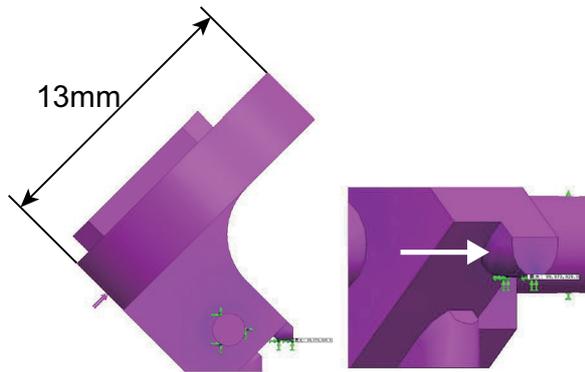


Fig. 7 Analysis of stress distribution of the follower

4.4 解析結果

解析の結果、妥当と判断したカムの形状と解析結果を Fig. 6 に示す。矢印の最薄部での最大応力が $4.2 \times 10^8 \text{N/m}^2$ となっており、材料の降伏強さである $6.2 \times 10^8 \text{N/m}^2$ を下回っているため、妥当な形状であると判断した。

また、同様の仮定で設計を行ったフォロアの形状を Fig. 7 に示す。矢印の最大応力集中部(フォロアアーム)において応力が $8.9 \times 10^7 \text{N/m}^2$ となっており、カムと同様に材料の降伏強さを下回っているため、妥当な形状であると判断した。

以上の結果から、最大応力がかかっても部材の破壊がおきないことが定量的に示された。

5. その他のデバイスの選定

本論文のマニピュレータを実現するために選定したデバイスを示す。

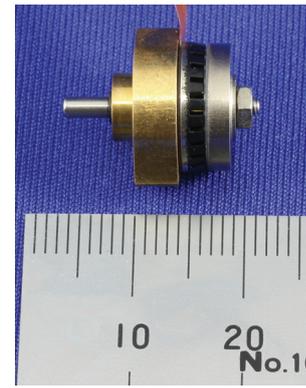


Fig. 8 Ultra sonic motor, USR12 (FUKOKU Co., Ltd.)

Table 1 Specifications of USR12

Rated torque	$4.0 \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{Nm}$
Rated speed	200 [rpm]
Diameter	12 [mm]
Length	11 [mm](excluding shaft)
Weight	3 [g]

デバイスは直径 12mm 以下、また、先端が狭い腹腔内で自在に動くためには、各節が短い必要がある。そこで、長さ方向にも短いデバイスを選定した。

5.1 超音波モータ

各関節の原動機として使用するモータについて述べる。モータには様々な種類が存在するが、今回は医療用マニピュレータとしての用途を考慮し、低速高トルク、小型扁平である超音波モータを候補に挙げた。

超音波モータは、圧電素子による超音波領域の振動と摩擦で駆動するアクチュエータである。特徴としては電磁波を発生させず、その影響も受けない。無通電時においても保持力を有する。低速高トルクといった特徴が挙げられる。本論文では、Fig. 8 に示す $\phi 12$ 超音波モータ USR12(株式会社フコク)⁷⁾ を使用する。Table 1 に同モータの仕様を示す。

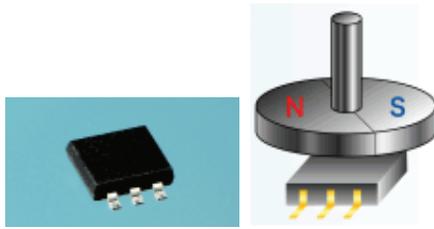


Fig. 9 Contactless angular sensor, EM-3242 (ASAHI KASEI MICRODEVICE Co., Ltd.)

Table 2 Specifications of EM-3242

Angular resolution	0.36 [deg](10bit)
Operating voltage	2.7~3.3 [V]
Size	3.6 × 3.0 × 0.95 [mm]
Weight	0.0243 [g]

5.2 非接触角度センサ

超音波モータ USR12 にはエンコーダがついていないため、角度センサを搭載する必要がある。エンコーダにも様々な種類が存在するが、同じく小型扁平な角度センサとして、Fig.9 に示す非接触角度センサ EM-3242 (旭化成エレクトロニクス株式会社⁸⁾) を使用する。EM-3242 はシリコン基板上に形成した複数のホール素子を用いた非接触角度センサである。2 極径方向に着磁された円盤形磁石と同センサを用いることで、回転角度を絶対角度で検出することができる。Table 2 に同センサの仕様を示す。

6. 設計したマニピュレータ

ここまでの検討により、設計したマニピュレータの関節を Fig. 10 に示す。同関節の寸法は直径 13 mm、長さ 35mm である。また、関節の可動範囲は $\pm 45\text{deg}$ で設計した。同関節を直列に 4 つ接続することで、Fig. 4 に示したような 4 関節 4 自由度のマニピュレータを構成する。同関節は、バックラッシュの小さな機構で構成されているため、直列に接続しても誤差の累積が極

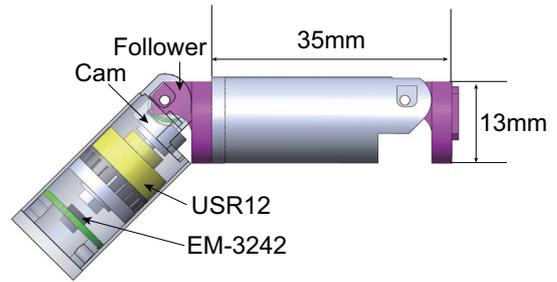


Fig. 10 Structure of a link of the manipulator

めて少ないと考えられる。なお、直径 13mm は現在一般的に使用されている腹腔鏡と同程度のサイズである。

7. おわりに

本論文では、従来の多自由度小型マニピュレータの持つ干渉性や誤差の蓄積といった問題点を解決するために、低バックラッシュ立体カム機構を用いた小型関節機構とマニピュレータを提案した。

関節部については、解析ツールを用いて定量的な設計を行った。また、関節全体の小型化のために、小型で低速高トルクな超音波モータを選定し、角度センサとして非接触角度センサを選定した。

今後は、変形クラウンギア減速機も考慮した試作機を製作し、マニピュレータの精度の評価、動作解析、制御法などの検討を行う。また、更なるマニピュレータの小型化を目標とした検討も行っていく。

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)
 - 6) 金田 徹: 3次元 CAE ツール【COSMOS シリーズ】による SolidWorks アドオン解析ツール利用入門, 技術評論社 (2008)
 - 7) 株式会社フコク: 超音波モータ, http://fukoku-rubber.co.jp/product/ultrasonic_motor.html, 16th, Nov., (2010)
 - 8) 旭化成エレクトロニクス株式会社: 非接触回転角度センサ EM-3242, <http://www.asahi-kasei.co.jp/ake/jp/product/apply/em3242.html>, 16th, Nov., (2010)