

# 軽量高速ロボット指モジュールの開発

Development of a lightweight high-speed finger module

○ 並木 明夫 (JST/東大) 亀田 博 小林 清人 坂田 順 (ハーモニック・ドライブ・システムズ)  
正 金子 真 (広大) 正 石川 正俊 (東大)

Akio NAMIKI (JST/Univ. of Tokyo), Hiroshi KAMEDA, Kiyoto KOBAYASHI, Jun SAKATA (Harmonic Drive Systems),  
Makoto KANEKO (Hiroshima Univ.), Masatoshi Ishikawa (Univ. of Tokyo)

**Abstract:** A new finger module is developed for high-speed dynamic grasping. The finger has two joints driven by servomotors built in it, and it equips force sensor at each joint. A newly designed actuator enables the finger to provide excellent features: It is lightweight (about 110g), and it is high-speed and powerful to reach about 4m/s and 4N at a finger tip, and backlash is small enough for high-gain feedback control. Experimental results are shown in which high-speed motion at 0.1s/180deg is realized. This finger module will be used for a multifingered hand to realize dexterous high-speed handling.

**Key Words:** : multi-fingered hand, lightweight actuator, high-speed grasping

## 1. はじめに

従来より、人間の手のように器用で柔軟な把握の実現を目指して、多指ロボットハンドの研究が進められてきた [1]。これらのハンドの多くは準静的な手の運動を対象としており、速さが必要とされないようなタスクに用いられていた。そのため、自由度や力制御性能は高いが、指の動作速度はそれほど速くはなかった。

しかし、動的な操りでは、ハンドに高速な動作が必要とされる場合がある。例えば、捕球動作を例にとると、100[km/h]の球をつかむためには、単純に計算して、指先には約 28[m/s] もの非常に速い運動が必要とされる。実際には、腕や体の動きが合わされるので、指単体にはこれほどの速さは要求されないが、それでも、従来のロボットハンドで実現するのは難しい。

このような背景のもとで、我々は高速性に重点をおいた多指ハンドの研究を行っている [2]。本稿では、本研究において開発した軽量高速指モジュールについて説明する。本指モジュールは 180 度開閉を 0.1 秒で実行する高速性を有している。

## 2. 設計方針

俊敏で高速な運動を実現するためには、速度と加速度がともに高い必要がある。このうち、加速度に関しては、[質量 × 加速度 = 力] の関係から、アクチュエータの出力を上げること、指機構を軽くすることの両方を行う必要がある。また、アームに搭載する場合には、モジュール全体の軽量化も必要となる。以上より、次のような設計方針のもとに開発を行った。

### (A) 高出力化

把握や操りの特性から、高い加速度が必要とされるのは瞬間的な高速動作のときのみであると考えられる。これは、アクチュエータでいうと、定格出力よりも最大出力を重点的に上げることに対応する。そこで、出力時間を限ることで、大出力が可能な軽量アクチュエータを開発した。

### (B) 軽量化

一般に、捕球などの高速動作は掌全体を使った包み込み把握で行われ、指先を使用した器用な動作にはそれほどの高速性は必要とされない場合が多い。そこで、高速動作が可能な関節を指付根に集中し、指先の関節は低速動作にのみ使用することとした。これより、指先のアクチュエータには非力な小型のものを使用できるため、指機構を軽量化することができた。

### (C) バックラッシレス

ハイゲインでのセンサフィードバック制御を行うためには、バックラッシを小さく抑える必要がある。

### (D) シンプルな機構設計

高速な動作は機構に大きな負担をかけるので、シンプルで強固な構造が必要となる。

## 3. 軽量高速指モジュール

上記の設計指針に基づき、高速ハンド用軽量アクチュエータと、それを用いた高速ロボット指モジュールを開発した。

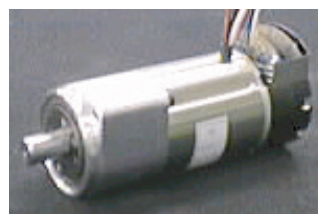
### 3.1 軽量アクチュエータ

バックラッシレスかつ軽量のハーモニックドライブ<sup>R</sup>減速機をベースにして、出力軸の軸受を 4 点支持ベアリングに置き換えるなどの小型化と軽量化を行うことで、新たな軽量減速器を開発した。また、集中整列巻きのポピンレスコイルとコアの分割化により、従来市販品に対し約 1.5 倍以上の巻線密度を持つ高出力サーボモータを開発した。エンコーダに関しては、軽重量材料の採用と薄肉構造及び高密度構造により軽量と小型化を図った。

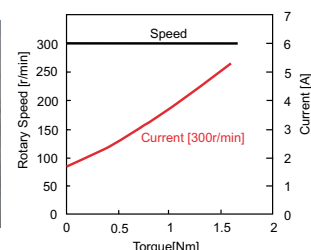
結果として、瞬時トルク/重量比に関して従来市販品の約 3.5 倍以上の能力を持つ軽量アクチュエータを実現することができた。Fig. 1 (a) と Table 1 に開発したアクチュエータの仕様と外観を示す。また、速度-トルク-電流性能を Fig. 1 (b) に示す。これより、高速回転時も出力トルクはほとんど下がることなく、理想的な出力特性を持つことがわかる。

Table 1 軽量アクチュエータの仕様

| モータータイプ             | AC サーボモーター        |
|---------------------|-------------------|
| 瞬時最大トルク [Nm]        | 1.71              |
| 最高回転速度 [r/min]      | 300               |
| 使用デューティ比 [%]        | 1                 |
| ステップ応答時間 [msec]     | 30 (0 → 300r/min) |
| 質量 [g]              | 60                |
| 位置センサ分解能 [p/r]      | 150               |
| 外形寸法 (外径 × 全長) [mm] | 20 × 45.7         |



(a) 写真



(b) 測定結果

Fig. 1 軽量アクチュエータ

### 3.2 指機構

第 1 軸 (指付根軸) と第 2 軸 (指先軸) の 2 関節を有し、前者を高速回転軸、後者を低速回転軸として割り当てた。第 1 軸では、高速、軽量、かつ高精度を満たすものとして開発した軽量ア

クチュエータを使用した。一方、第2軸では、それほどの高速性を必要としないために、市販の小型アクチュエータを使用した。

また、アクチュエータと各関節の間の伝達機構としては、傘歯車を採用した。これは、指モジュールの構造上、アクチュエータと関節の回転軸は直交する必要がある、直交伝達機構の中では傘歯車は高速運動に耐えうる最もシンプルな機構と考えたためである。バックラッシ防止のために、快削鋼 SUM23 に高い硬度を持つ60分タフライド軟窒化処理を行って歯車を製作し、穴部をラッピング加工して歯の偏心誤差が極小となるようにした。さらに、歯面には4[μm]程度のデフリックコーティングを行った。結果として、バックラッシをほとんどなくして、滑らかな回転を実現することができた。

Table 2 と Fig. 2 に開発した指モジュールの仕様と外観を示す。全体で110g以下の軽量にも関わらず、指先において3.7[m/s]もの高速運動と4.4[N]もの指先力を実現できた。また、各軸のバックラッシも小さく、高いゲインでのフィードバック制御が可能である。ここで、第2軸のバックラッシが大きいのは、市販のアクチュエータを用いているためであり、将来的にはアクチュエータを置き換えることで第1軸並に改善する予定である。

Fig. 3 に機構設計図と可動範囲を表した図を示す。各軸に対応して歪みゲージを装備しているため、力制御に対応可能である。

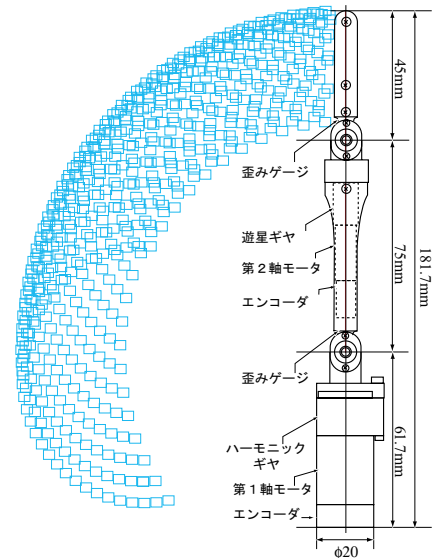


Fig. 3 軽量高速指モジュールの機構

Table 2 軽量高速指モジュールの仕様

|                 | 第1軸 (指付根)                           | 第2軸 (指先)                            |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 減速比             | 50                                  | 128                                 |
| 最高角速度 [rad/sec] | 30                                  | 3                                   |
| 最大トルク [Nm]      | 1.3                                 | 0.2                                 |
| バックラッシ [分]      | 0.8                                 | 21.0                                |
| 可動範囲 [rad]      | $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ | $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ |
| 最高指先速度 [m/s]    | 3.7                                 |                                     |
| 最大指先力 [N]       | 4.4                                 |                                     |
| 重量 [g]          | 107.4                               |                                     |

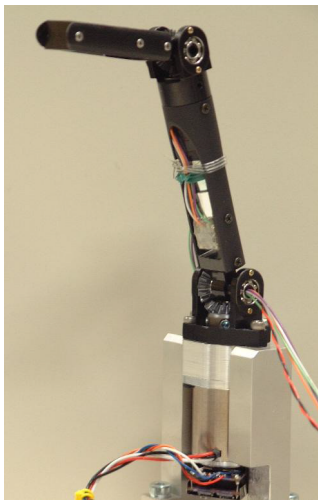


Fig. 2 軽量高速指モジュール

#### 4. 性能評価実験

開発した指モジュールの性能を評価するために実験を行った。指モジュールの第1軸にPDフィードバック(Pゲイン: 24.4[A/rad], Dゲイン: 0.16[A・s/rad])をかけて位置制御を行い、指令値として10[Hz]の正弦波を与えたときの応答をFig. 4に、また、ステップ応答を与えたときの応答をFig. 5に示す。これより、10[Hz]程度の運動には、ほとんど遅れなく追従していることが示されている。また、ステップ応答の結果より、180度の開閉を0.1[s]以内に終えていることがわかる。

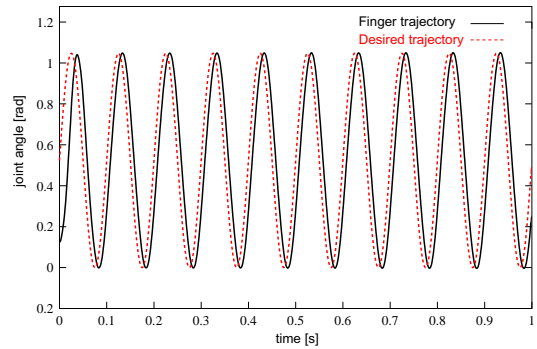


Fig. 4 正弦波応答

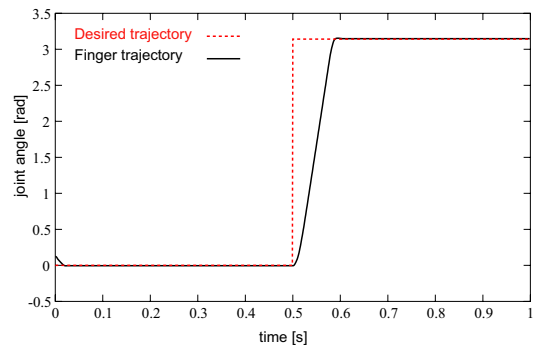


Fig. 5 ステップ応答

### 5. まとめ

高速な把握操り動作のために開発した軽量高速指モジュールについて述べた。現在、掌部と手首部の開発を進めており、それらを合わせることで多指ハンドの構築を目指している。今後の課題としては、視覚と力のセンサフィードバック制御に対応させ[3]、動的な把握・操りタスクを実現することを考えている。

#### 参考文献

- [1] 特集「器用な手」. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, 2000.
- [2] 並木, 金子, 石川. 感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 47-48, 2000.
- [3] 並木, 中坊, 石川. 高速視覚を用いたダイナミックマニピュレーションシステム. 第19回日本ロボット学会学術講演会, pp. 389-390, 2001.