

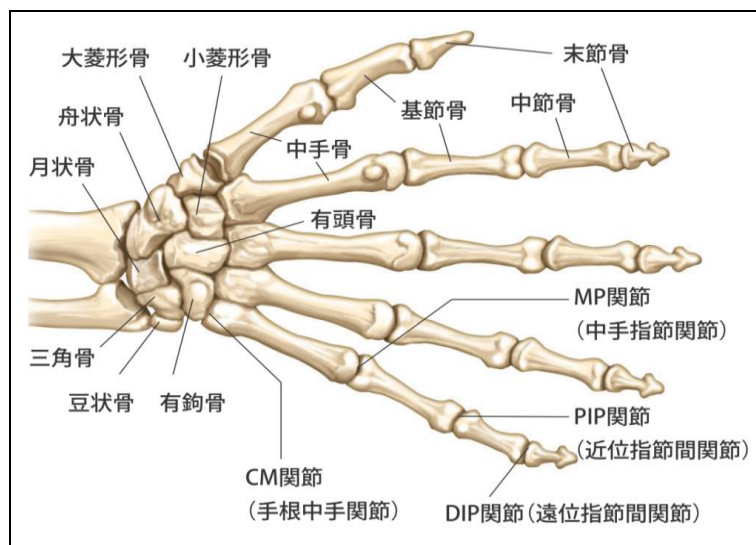
<b>手の仕組みについての考察 (公開資料)</b> (Consideration of the mechanism of the hand)			作成 2020/5/1
初版	—	2020/5/1	ニューラルソフト有限会社 市来 博記
B	文章フォーマットを変更した。	2021/12/25	

## 1. はじめに

人が行う一般的な作業を遂行させることが可能なロボット（ヒューマノイド）の手を設計するため、人の手の仕組みを調査し、設計指針を検討した。

## 2. 人の手の仕組み

### 2.1. 骨格



(ナースフルの『第1章 骨・神経・骨格筋の解剖と働き』より)

- 手の骨格は8個の手根骨、5個の中手骨、14個の指節骨（基節骨、中節骨、末節骨）からなる。
- 人差し指から小指は指節骨が3個ずつ連結しているが、母指には中節骨がなく、基節骨と末節骨だけである。
- 手根骨と中手骨はCM関節、中手骨と基節骨はMP関節、基節骨と中節骨はPIP関節、中節骨と末節骨はDIP関節をつくる。

### 手の指関節の特徴

	CM	MP	IP	
			PIP	DIP
第1指 (母指)	屈曲伸展と内外転やその組み合わせによる回旋運動が可能。中手骨は屈曲する際に内旋し、内転する際には外旋運動を伴う。	屈曲伸展と内外転運動が可能。(内外転可動域は小さい。)	屈曲伸展運動のみ可能。(単純な屈伸ではなく、基節骨頭の形状により、屈曲時に回内運動を伴う。)	
第2,3指	ほとんど可動性なし。	屈曲伸展と内外転や分回し運動が可能。(屈曲時には内外転は不能)	屈伸運動のみ可能。	
第4,5指	それぞれ20度,44度程度の屈曲伸展運動が可能。但し、第4CM関節を固定した状態では、第5CMの可動域は28度程度まで減少する。			

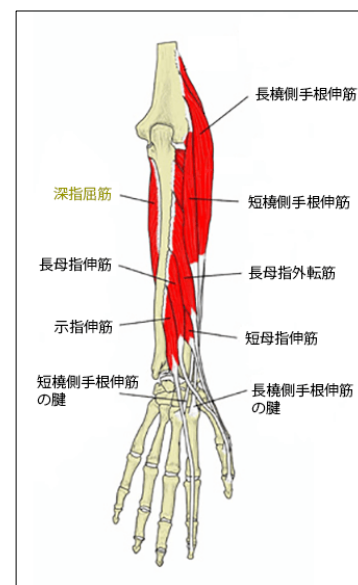
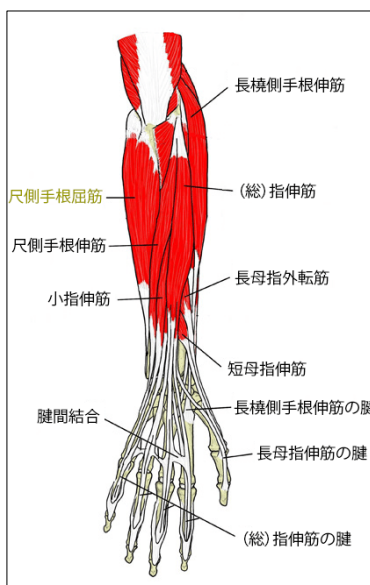
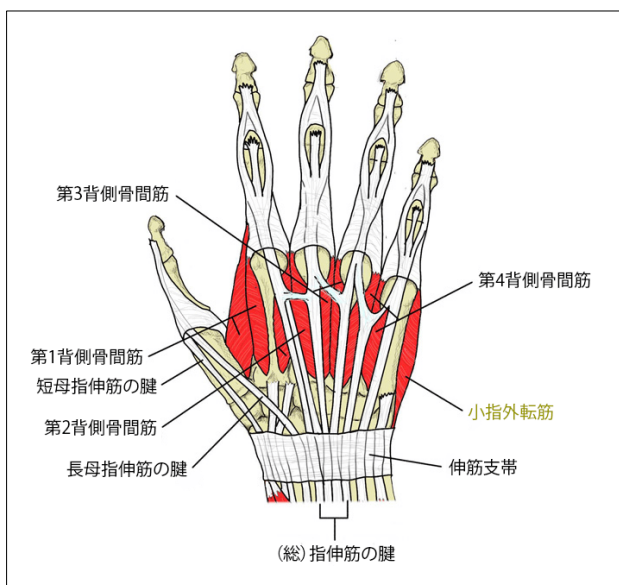
## 2.2. 筋系

### 手首と手指の動きに関わる筋系の分類

部位		筋の名称	背側/掌側			
前腕筋	屈筋群	第1層	<a href="#">橈側手根屈筋</a> (手首に作用) <a href="#">長掌筋</a> (手首に作用) <a href="#">尺側手根屈筋</a> (手首に作用)	掌側		
		第2・3層	<a href="#">浅指屈筋</a> <a href="#">深指屈筋</a> <a href="#">長母指屈筋</a>	掌側		
		伸筋群	前腕橈側の筋	<a href="#">長橈側手根伸筋</a> (手首に作用) <a href="#">短橈側手根伸筋</a> (手首に作用)	背側	
			前腕後面浅層の筋	<a href="#">総指伸筋</a> <a href="#">小指伸筋</a> <a href="#">尺側手根伸筋</a> (手首に作用)	背側	
				前腕後面深層の筋	<a href="#">長母指外転筋</a> <a href="#">短母指伸筋</a> <a href="#">長母指伸筋</a> <a href="#">示指伸筋</a>	背側
					背側	
					背側	
	手	母指球筋	<a href="#">母指内転筋</a> <a href="#">短母指外転筋</a> <a href="#">短母指屈筋</a> <a href="#">母指対立筋</a>	掌側		
			小指球筋	<a href="#">短掌筋</a> <a href="#">小指外転筋</a> <a href="#">短小指屈筋</a> <a href="#">小指対立筋</a>	掌側	
				中手筋	<a href="#">虫様筋</a> <a href="#">背側骨間筋</a> <a href="#">掌側骨間筋</a>	背側
					掌側	
			掌側			

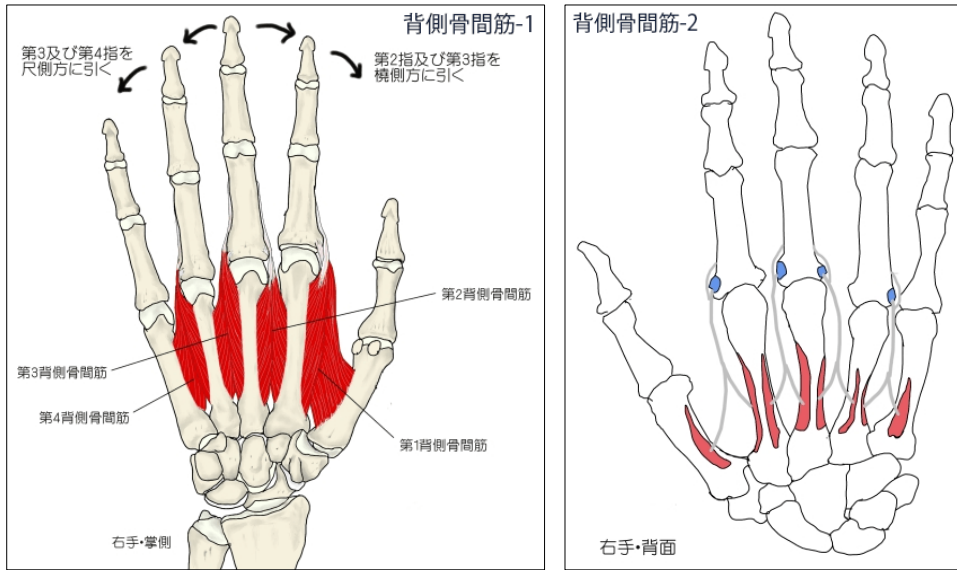
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

### 手背側の筋系



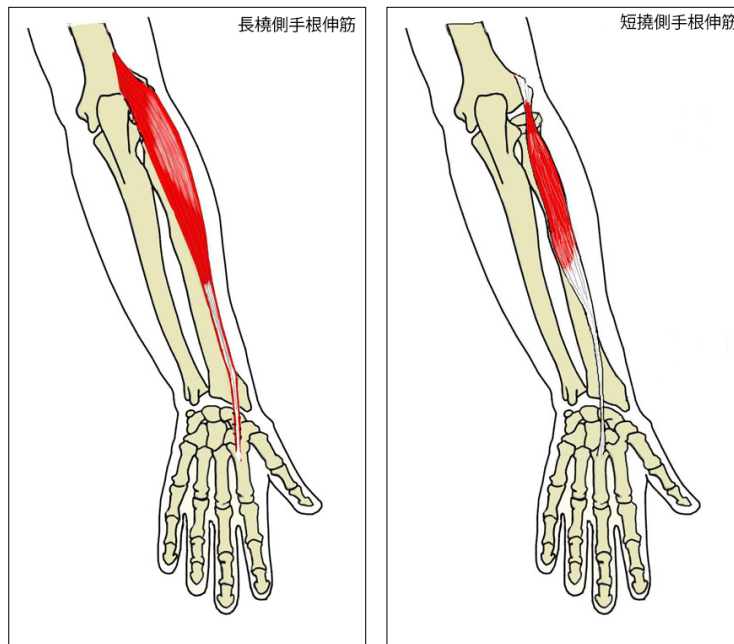
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

## 手/中手筋



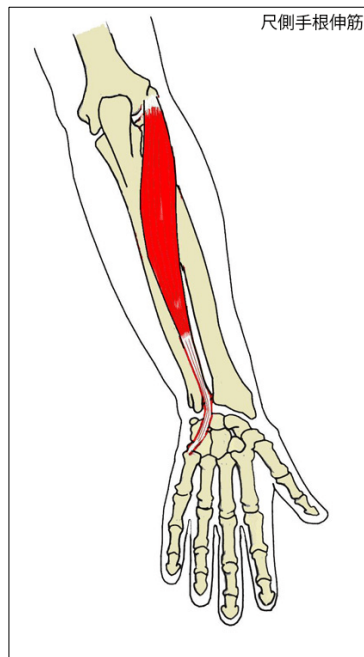
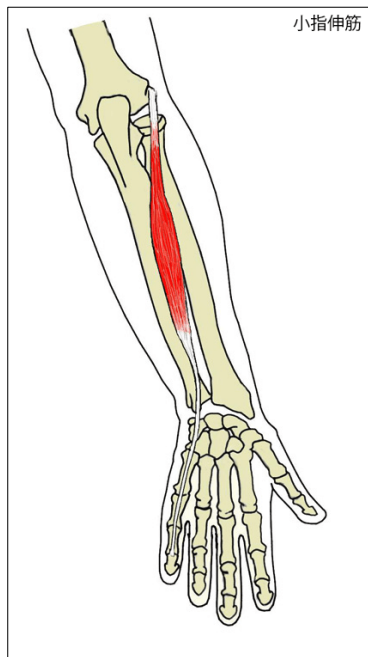
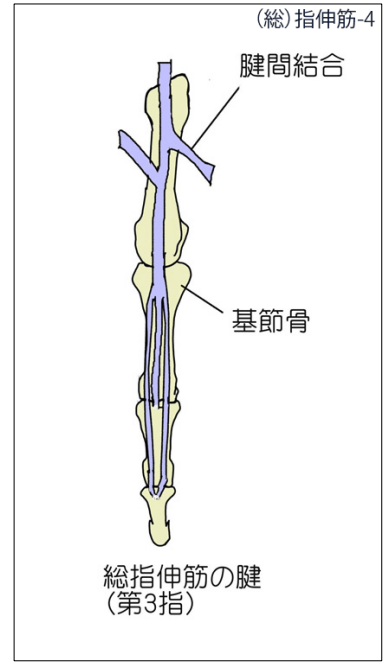
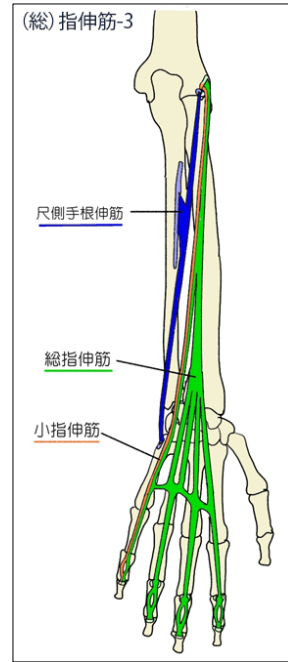
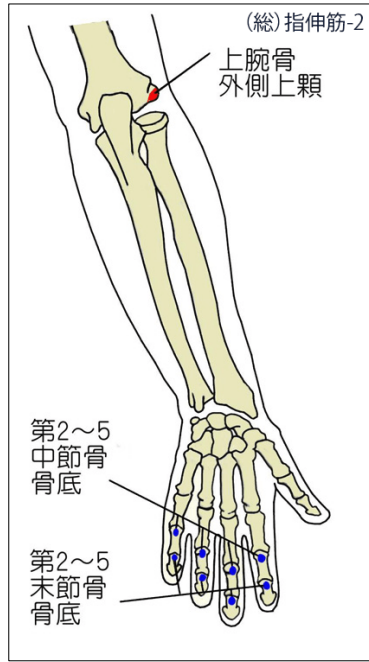
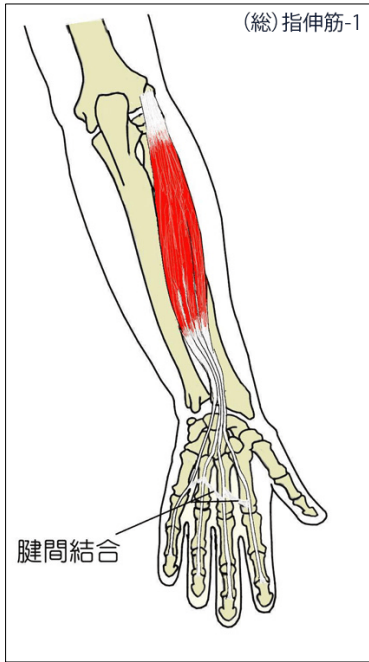
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

## 前腕筋/伸筋群/前腕橈側の筋



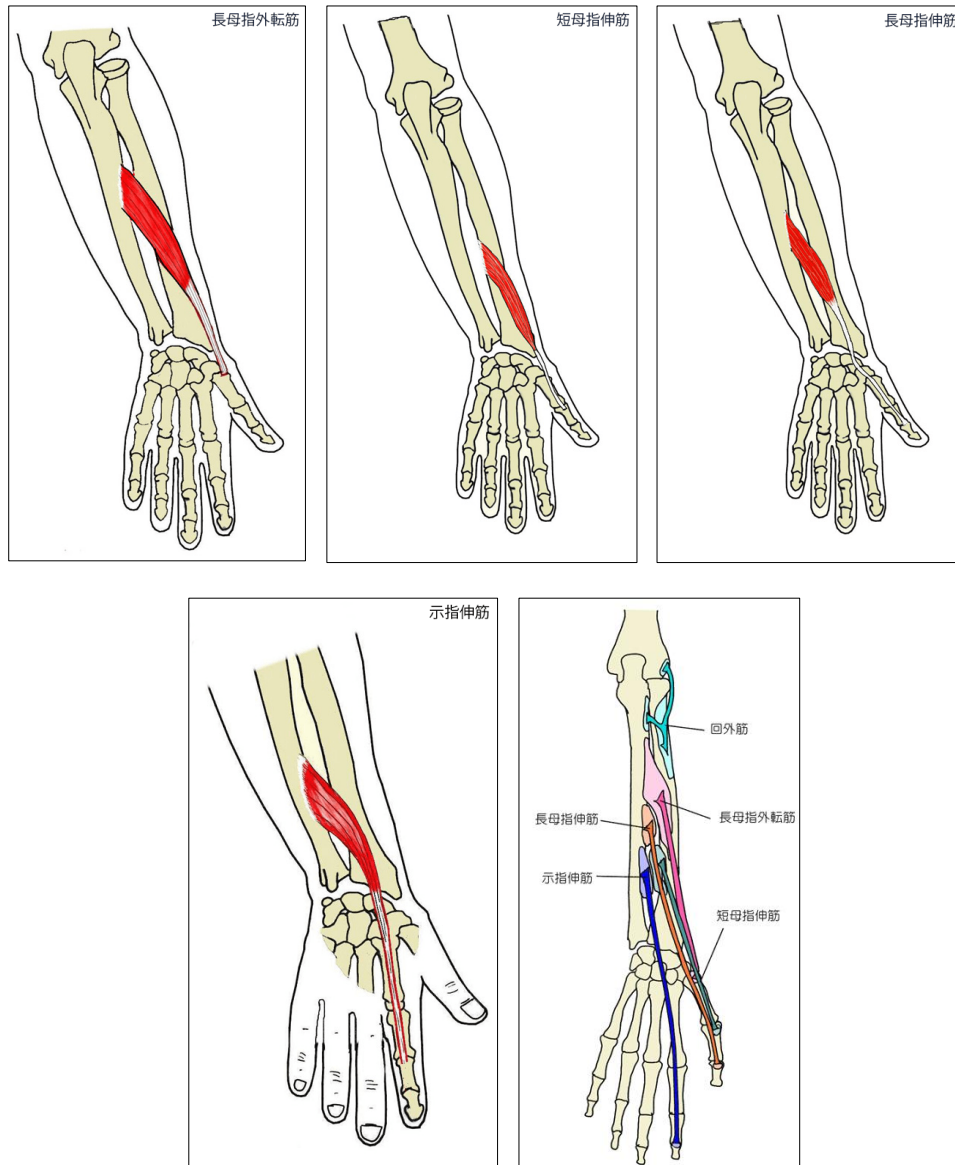
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

前腕筋/伸筋群/前腕後面浅層の筋



(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

前腕筋/伸筋群/前腕後面深層の筋

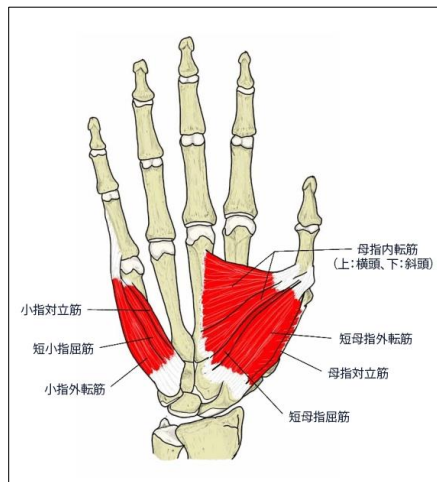
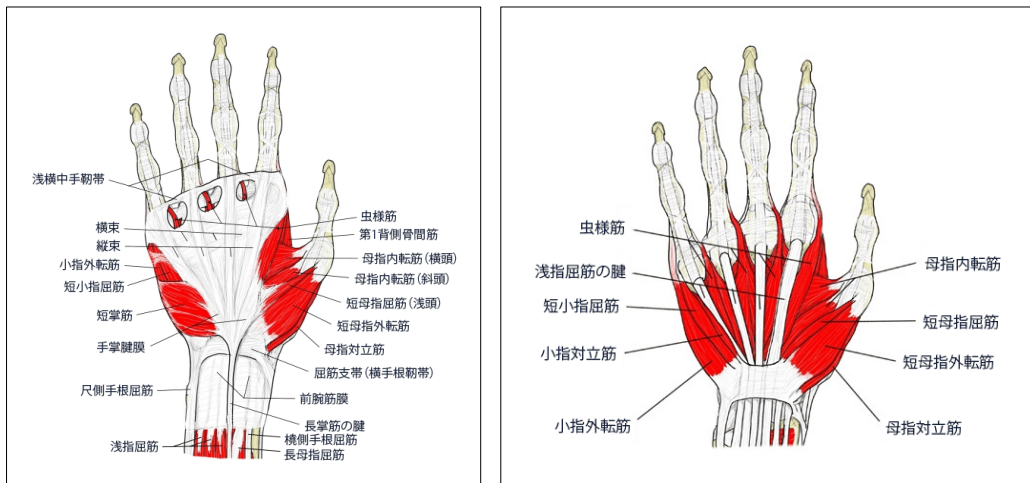


(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

- [長橈側手根伸筋](#)は手関節の背屈、橈屈を行う。
- [短橈側手根伸筋](#)は手関節の背屈、橈屈を行う。
- [\(総\)指伸筋](#)は第2～5指のDIP関節、PIP関節、MP関節の伸展、手関節の背屈を行う。
- [小指伸筋](#)は小指の伸展、外転を行う。
- [尺側手根伸筋](#)は手関節の背屈、尺屈を行う。
- [長母指外転筋](#)は母指の外転、伸展、手関節の橈屈を行う。
- [短母指伸筋](#)の腱は母指MP関節の伸展、母指外転を行う。
- [長母指伸筋](#)の腱は母指IP関節、MP関節の伸展、橈側外転、掌側内転を行う。
- [示指伸筋](#)は示指の伸展、手関節の背屈を行う。
- [背側骨間筋](#)は第2・4指MP関節の外転、屈曲、第3指MP関節の橈屈、尺屈、第2・3・4指PIP関節、DIP関節の伸展を行う。

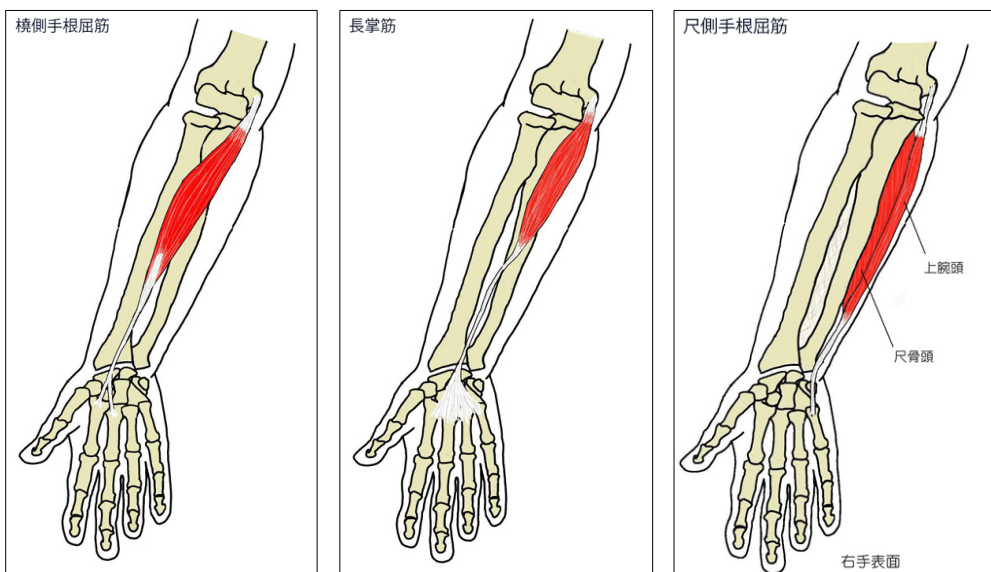


# 掌側の筋系



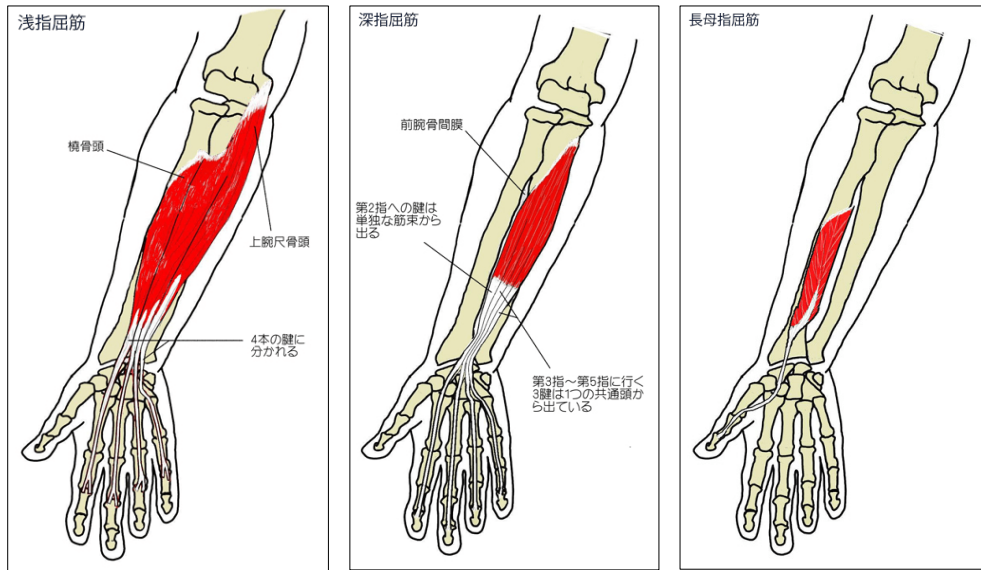
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

## 前腕筋/屈筋群/第1層の筋



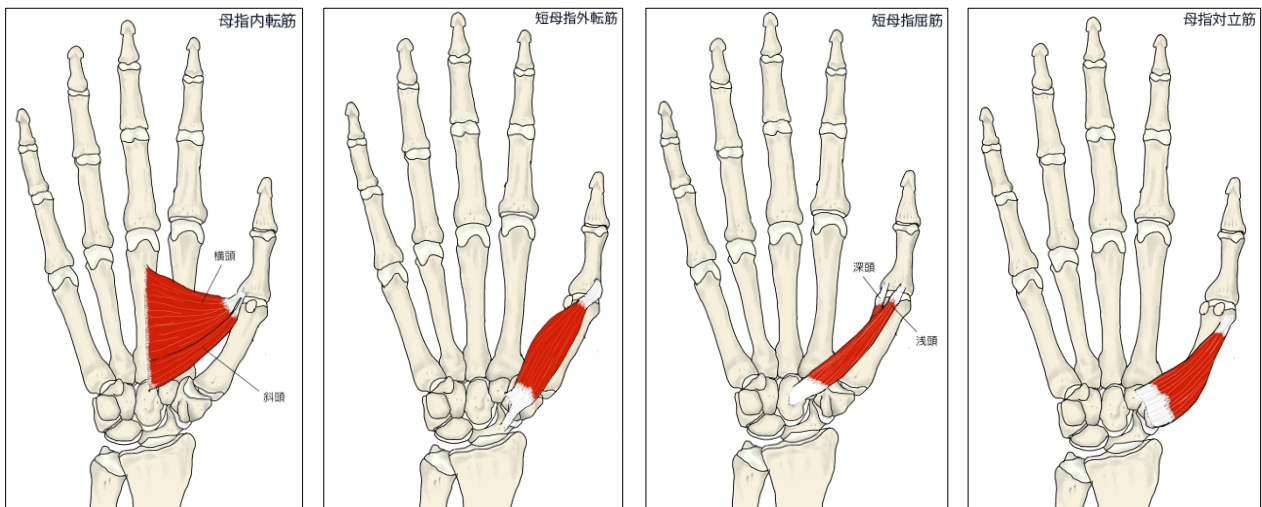
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

前腕筋/屈筋群/第2・3層の筋



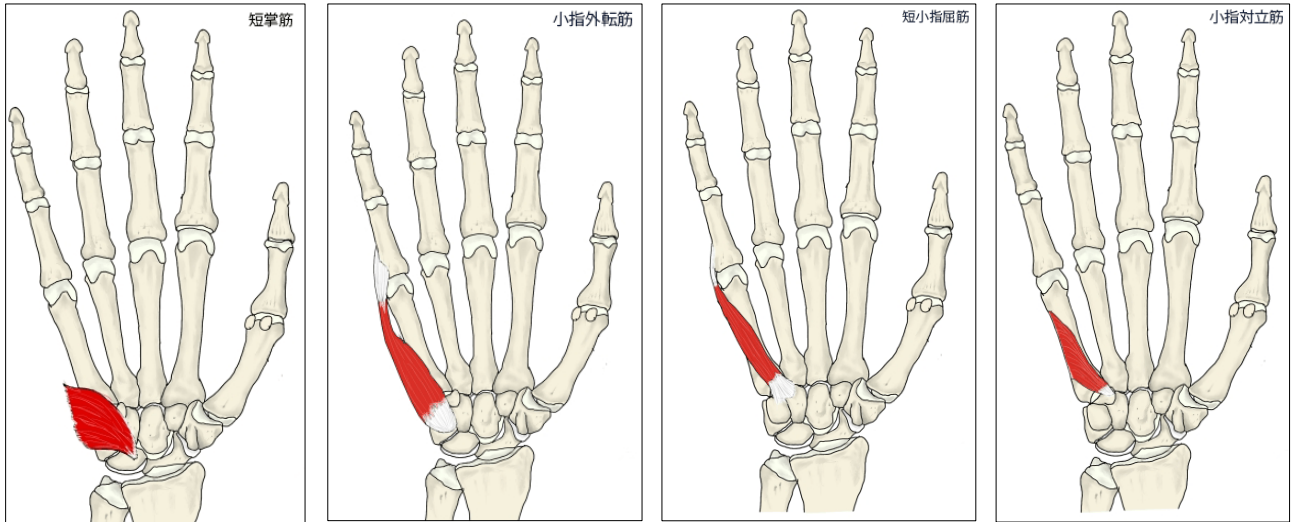
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

母指球筋



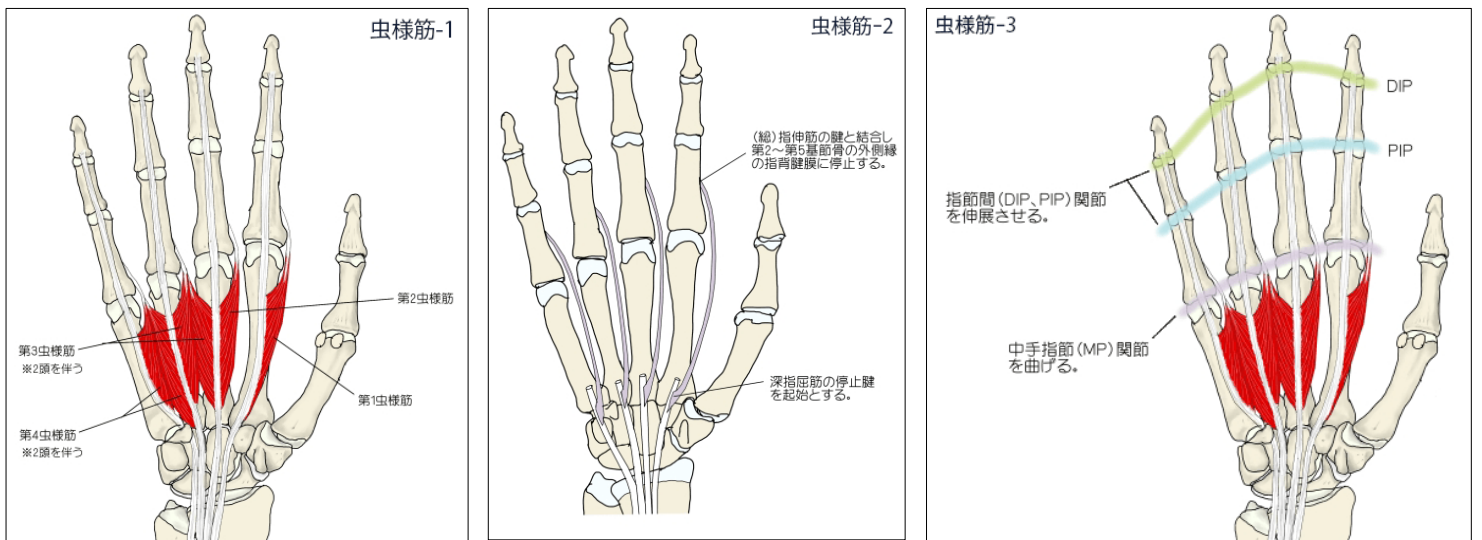
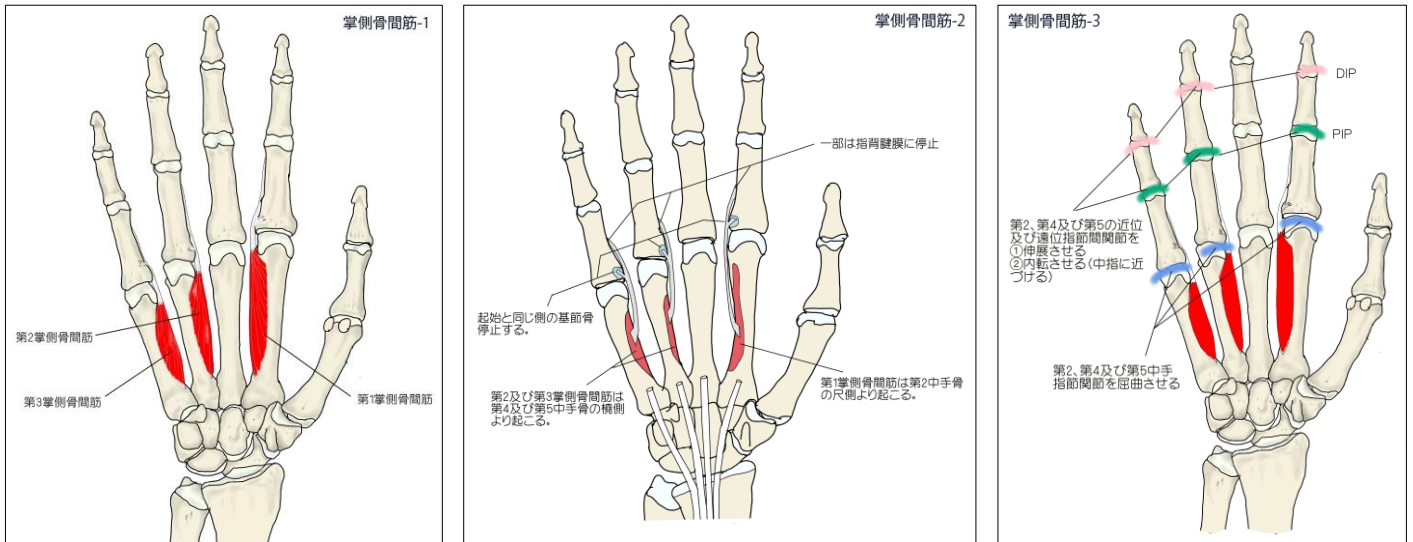
(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

## 小指球筋



(フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より)

## 中手筋



フィットネスの勧めの『解剖学(Anatomy)』より

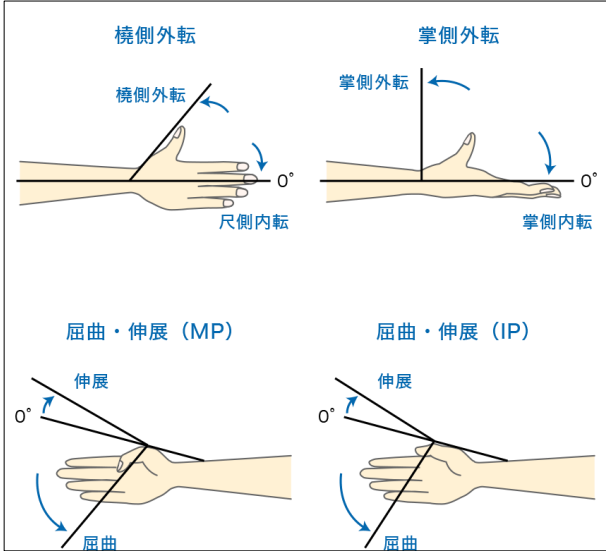


- [橈側手根屈筋\(腱\)](#)は手関節の掌屈、橈屈、前腕の回内（橈骨と尺骨がクロスする方向への回転）を行う。
- [長掌筋\(腱\)](#)は手関節の掌屈、手掌腱膜の緊張を行う。
- [尺側手根屈筋](#)は手関節の掌屈、尺屈を行う。
- [浅指屈筋\(腱\)](#)は第 2～5 指 PIP 関節の屈曲、手関節の掌屈を行う。
- [深指屈筋\(腱\)](#)は第 2～5 指 DIP 関節の屈曲、手関節の掌屈を行う。
- [長母指屈筋](#)は母指 IP 関節、MP 関節の屈曲を行う。
- [母指内転筋](#)は母指の内転を行う。
- [短母指外転筋](#)は母指 MP 関節の屈曲、母指 CM 関節の掌側外転を行う。補助的作用として、母指の対立、IP 関節の伸展も行なう。
- [短母指屈筋](#)は母指 MP 関節の屈曲を行う。
- [母指対立筋](#)は母指の対立、CM 関節の屈曲を行う。
- [短掌筋](#)は手掌腱膜の緊張を行う。
- [小指外転筋](#)は小指 MP 関節の屈曲と外転を行う。
- [短小指屈筋](#)は小指 MP 関節の屈曲を行う。
- [小指対立筋](#)は小指の対立を行う。
- [掌側骨間筋](#)は第 2、4、5 指 MP 関節の内転、屈曲、PIP 関節、DIP 関節の伸展を行う。
- [虫様筋](#)は第 2～第 5 指の MP 関節を屈曲し、DIP・PIP 関節を伸展させる。

## 2.3. 指の運動

### 母指の運動

母指運動の分類



交通事故被害者徹底サポートの『関節可動域の測定要領 - 母指』より

母指の運動に関する筋

運動方向	作動筋
橈側外転	長母指外転筋
	短母指外転筋
	長母指伸筋
尺側内転	長母指伸筋
	母指内転筋
	母指対立筋
掌側外転	長母指屈筋
	短母指屈筋
	母指対立筋
掌側内転	母指内転筋
	長母指伸筋
	短母指屈筋
屈曲	長母指屈筋
	短母指屈筋
	短母指外転筋
伸展	長母指伸筋
	短母指伸筋
	長母指伸筋
対立	母指内転筋
	母指対立筋
	長母指屈筋
	短母指屈筋
	短母指外転筋

母指の運動に関する筋の起始と停止位置

筋	起始	停止
長母指屈筋	橈骨の前面 (約 1/2 領域付近)、前腕骨間膜	母指末節骨の底
長母指外転筋	尺骨の骨間縁、前腕骨間膜、橈骨の後面中部	第 1 中手骨底部
短母指伸筋	橈骨の後面 (中央部より遠位)、前腕骨間膜	母指、基節骨底
長母指伸筋	尺骨、前腕骨間膜	母指末節骨底
母指内転筋	斜頭: 第 3 中手骨底の掌側面 横頭: 有頭骨、第 2 中手骨底	斜頭/横頭: 尺側の種子骨を介して第 1 基節骨
短母指外転筋	舟状骨、大菱形骨、屈筋支帯の橈側端	橈側の種子骨を介して母指基節骨の底
短母指屈筋	浅頭: 屈筋支帯の橈側端 深頭: 大菱形骨、小菱形骨、有頭骨	浅頭: 橈側端の種子骨を介して母指の基節骨の底 深頭: 尺側端の種子骨を介して母指の基節骨の底
母指対立筋	大菱形骨、屈筋支帯の橈側端	第 1 中手骨の橈側縁

母指は、他の 4 本の指と対立位をとり、つまみ動作や握り動作など手の機能の中で中心的な役割を果たしている。母指の手根中手関節は、中手指節関節や指節間関節と比べて、関節の自由度が高い。手根中手関節の形態は、鞍状関節とよばれ、2 つの鞍を直交させて合わせた形で、大きな可動域をもたらしている。

母指は、橈側外転・尺側内転、掌側外転・掌側内転、屈曲・伸展、対立、回旋 (左記運動の組み合わせ) 運動が可能で、4 つの外在筋 (長母指屈筋、長母指外転筋、長母指伸筋、短母指伸筋) と 4 つの内在筋 (短母指屈筋、短母指外転筋、母指対立筋、母指内転筋) が作用している。

#### 母指の橈側外転・尺側内転運動の詳細

橈側外転は手掌を机につけたまま母指を示指から離す方向に動かす運動で、長母指外転筋、短母指外転筋、短母指屈筋、長母指屈筋が作用する。

### **母指の掌側外転・掌側内転運動の詳細**

掌側外転は手背を机につけたまま、母指を机から離す方向へ垂直に動かす運動で、長母指屈筋、短母指屈筋、母指対立筋、短母指外転筋が作用する。掌側内転は掌側外転から戻す方向の運動で、母指内転筋、長母指伸筋が作用する。

### **母指の屈曲・伸展運動の詳細**

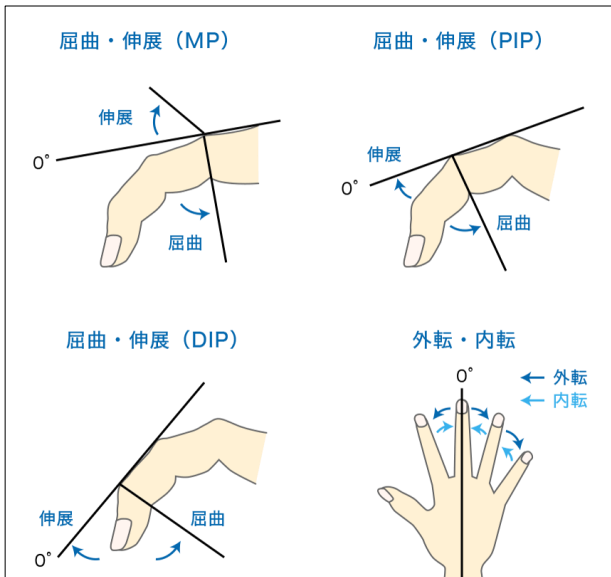
母指の屈曲運動には、短母指屈筋、長母指屈筋、短母指外転筋が作用している。母指の伸展運動には、短母指伸筋、長母指伸筋、長母指外転筋が作用している。

### **母指の対立運動の詳細**

母指の指腹部を手掌に向かい合わせるような運動で、母指内転筋、母指対立筋、長母指屈筋、短母指屈筋、短母指外転筋が作用する。

## 指（第2~5指）の運動

指（第2~5指）運動の分類



交通事故被害者徹底サポートの『関節可動域の測定要領 - 指』より

指（第2~5指）の運動に関する筋

運動方向	作動筋
屈曲(MP)	虫様筋
	小指外転筋
	短小指屈筋
	掌側骨間筋
伸展(MP)	(総)指伸筋
	小指伸筋
	示指伸筋
	虫様筋
屈曲(PIP/DIP)	浅指屈筋(PIP 関節に作用)
	深指屈筋(DIP 関節に作用)
伸展(PIP/DIP)	(総)指伸筋
	小指伸筋
	示指伸筋
	背側骨間筋(第2・3・4指)
	掌側骨間筋(第2・4・5指)
外転	背側骨間筋(第2・3・4指)
	小指外転筋
内転	掌側骨間筋
	小指対立筋(CM 関節に作用)

指（第2~5指）の運動に関する筋の起始と停止位置

筋	起始	停止
浅指屈筋	上腕尺骨頭: 上腕骨の内側上顆、尺骨の粗面(内側) 橈骨頭: 橈骨の前面(1/2よりも近位)	第2~第5中節骨の骨底
深指屈筋	尺骨の前面上部2/3、前腕骨間膜	第2~第5末節骨の骨底 (腱はそれぞれ手根管を通過して浅指屈筋の2つに分かれた腱の間を通過して末節骨に至る。)
(総)指伸筋	上腕骨の外側上顆、前腕筋膜	第2~第5中節骨の骨底、第2~第5の末節骨底
小指伸筋	上腕骨の外側上顆	第5指の末節骨及び中節骨、背側面の骨底
示指伸筋	尺骨の後面(中央部より遠位)、前腕骨間膜、 尺側手根伸筋の筋膜	第2指の指背腱膜 (総指伸筋の第2指腱と共通)
小指外転筋	豆状骨	第5基節骨の底の尺側縁および指背腱膜
短小指屈筋	有鈎骨鈎、屈筋支帯	第5基節骨の底
小指対立筋	有鈎骨鈎	第5中手骨の尺側縁
虫様筋	指屈筋の停止腱	第2~第5基節骨の外側縁の指背腱膜
背側骨間筋	第1~第5中手骨の向かい合っている骨底の側面	第2~第4基節骨の骨底(一部は指背腱膜に合する。)
掌側骨間筋	第2、第4、および第5中手骨 (第1掌側骨間筋は第2中手骨の尺側より、第2 および第3掌側骨間筋は第4および第5中手骨の 橈側を起始とする)	それぞれ起始する中手骨と同じ側で、直上の基節骨に停止する。 (一部は指背腱膜に停止する。)

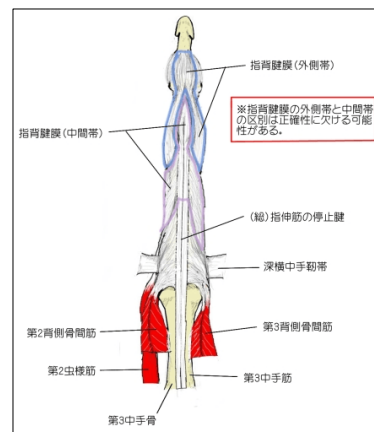
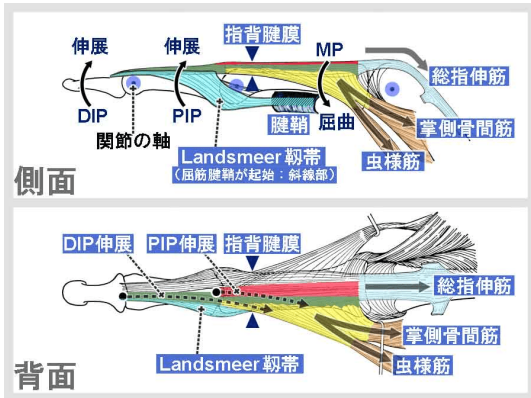
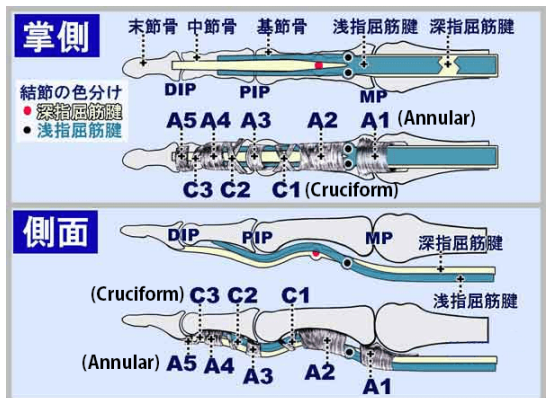
第2~5指の手根中手関節の動きは限られており、軽度の屈曲伸展運動のみ可能であるが、中手指節関節は自由度が高く、屈曲伸展に加えて、内外転も可能である。第2,3指に比べると第4,5指の手根中手関節の可動域は大きい。これは手掌部を円錐状にすることを可能し、物を把持することに貢献している。

第2~5指の屈曲伸展は主に外在筋の深指屈筋(DIPの屈曲)と浅指屈筋(PIPの屈曲)の屈筋系と、指伸筋の伸筋系が作用する。開閉(内外転)は手内在筋の骨間筋と虫様筋が作用する。手内在筋は屈曲伸展にも関与し、微妙な指の動きを可能にしている。又、手関節の状態も指の運動に影響を与える。指のスムーズな運動は、その運動に関連する筋と反対方向への運動に関連する筋が同時に作用することで実現されている。

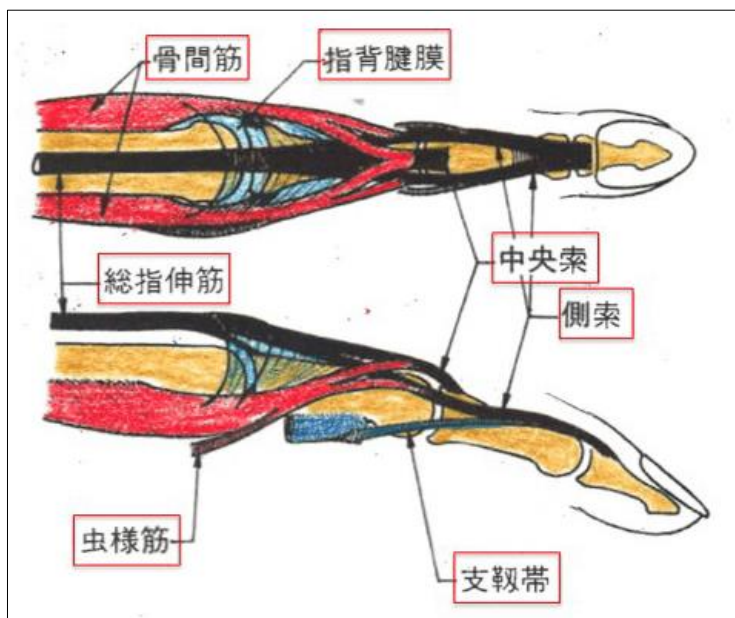
以下に指の屈曲・伸展機構の図を示し、その次に、手指の屈曲と伸展の動作の詳細を示す。



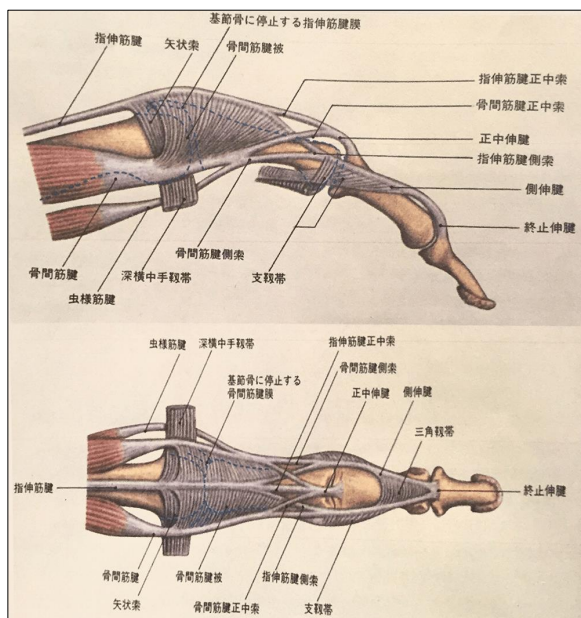
# 指の屈曲・伸展機構



医療法人 湯本整形外科ホームページより



古東整形外科のホームページより



プラザ接骨院のホームページより

## 手指の屈曲動作の詳細

意識しない自然な状態で指を曲げる場合：

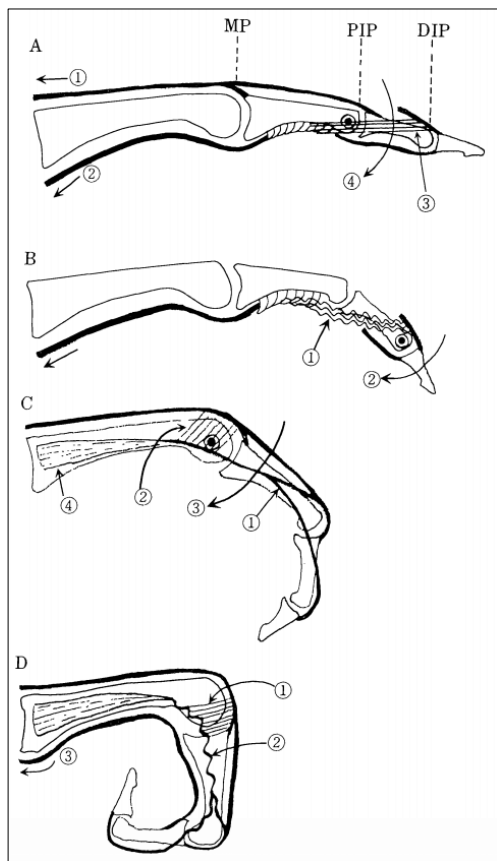
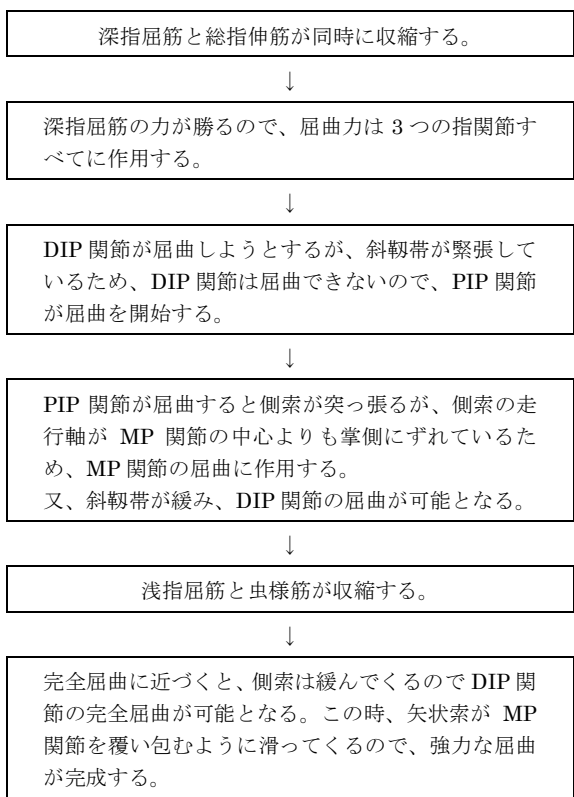


図 手指の屈曲(図中の◎は回転軸を表す。)

意識的にPIPとDIP(IP関節)を伸ばしたままMP関節を屈曲させる場合：

深・浅指屈筋は作用せず、虫様筋のみが作用する。骨間筋はMP関節で虫様筋よりも背側を通っているので、MP関節の肢位に影響されやすい。MP関節屈曲位では骨間筋によるIP関節の伸展力は小さく、虫様筋によるところが大きい。

- A:① 総指伸筋がブレーキの役割を担う。  
② 深指屈筋は屈曲力として作用する。  
③ DIP関節が屈曲しようとするが、斜靭帯が緊張しているため屈曲できない。  
④ そこで、PIP関節が屈曲を開始する。
- B:① PIP関節が屈曲してくると、斜靭帯が弛緩してくる。  
② 深指屈筋の作用で、DIP関節が屈曲してくる。
- C:① PIP関節が屈曲してくると、側索が緊張してくる。  
② 矢状索が末梢にずれ始め、側索の走向は、回転中心よりも掌側となる。  
③ MP関節の屈曲が始まる。  
④ 骨間筋は側索を通じて、屈曲に作用する。
- D:① 矢状索が末梢に滑り降りることで、強力な把握が可能となる。  
② MP関節が屈曲することで、側索は緩みDIP関節の完全屈曲が可能となる。  
③ 最後の完全把握時には浅指屈筋が主役となる。

## 手指の伸展動作の詳細

自然に指を伸ばす場合：

まず MP 関節の伸展から始まる。これは総指伸筋の作用である。MP 関節が伸展することにより、側索に緊張が伝わるようになり、PIP 関節の伸展が可能となる。PIP 関節が伸展することで、斜靭帯に緊張が伝わり DIP 関節の伸展が行われる。この場合、虫様筋が収縮し深指屈筋を緩めるので、ますます DIP 関節は伸展しやすくなる。

MP 関節と PIP 関節を屈曲させたままの場合：側索に緊張が伝わらないため、DIP 関節の伸展は不可能である。

MP 関節をさせたままの場合：

側索が緩んでいるため（逆に屈曲力に加担している）、IP 関節の伸展はしにくい。この時の伸展は総指伸筋と虫様筋が主に作用している。

骨間筋の作用：

骨間筋の作用は MP 関節の肢位に大きく左右される。MP 関節屈曲位時には、総指伸筋の基節骨付着部は末梢にずれて緩み、PIP 関節の伸展に作用する。しかし、側索は緩んでいるので、PIP 関節の伸展には働かない。MP 関節が伸展位の際は、総指伸筋の基節骨付着部は緊張しており、総指伸筋は MP 関節の伸展に作用する。逆に中節骨基部の停止部は弛緩して、PIP 関節の伸展には作用しない。骨間筋が側索を通じて緊張し、PIP 関節の伸展に作用する。

過伸展の制動：

MP 関節と IP (PIP/DIP) 関節の掌側板は過伸展を制動している。PIP 関節の掌側板は過伸展を MP 関節よりも強力に制動している。PIP 関節が拘縮を生じる場合に、MP 関節と逆に屈曲位拘縮を生じるのは、この掌側板が主要因となる。

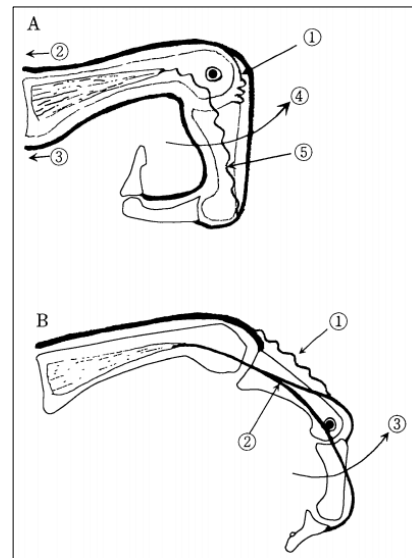
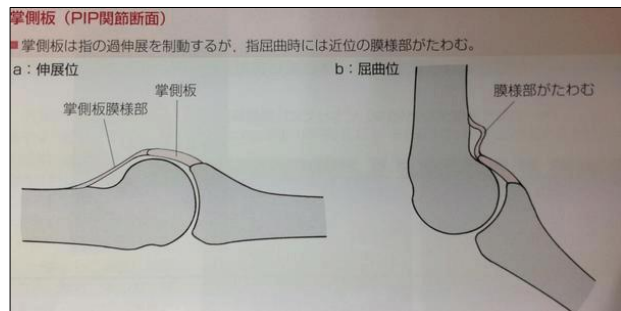


図 手指の伸展(図中の◎は回転軸を表す。)

- A:① 総指伸筋の基節骨停止部は MP 関節屈曲位では弛緩している。  
 ② 総指伸筋の力は、指全体に作用する。  
 ③ 深指屈筋はブレーキの役割を担う。  
 ④ A②と A③の力は、合力として、MP 関節の伸展に作用する。  
 ⑤ MP 関節が伸展してくるまで、側索は弛緩し、PIP 関節の伸展には作用しない。
- B:① 関節が伸展してくると、総指伸筋の力は矢状索に吸収され、PIP 関節の伸展に作用しなくなる。  
 ② 側索が緊張してくる。  
 ③ 骨間筋の力が PIP 関節の伸展に作用する。



一般社団法人日本治療家研究所のツイートより



まる接骨院のホームページより

示指と小指は固有伸筋腱があるため、独立して伸展が可能である。逆に中指と環指は伸筋腱の間に腱間結合があることもあって、独立した動きが阻害される。

### 手指の外転・内転動作の詳細

指の外・内転は、骨間筋の作用による。骨間筋は中手骨から起始し、基節骨基部に停止し、一部の線維を側索に送り、指の屈伸にも関与している。掌側骨間筋は示指尺側、環指橈側、小指橈側の基節骨基部に停止し、内転に作用する。背側骨間筋は示指橈側、中指橈側および尺側、環指尺側に停止し、外転に作用する。小指の外転は小指外転筋が行っている。

中手骨頭は、やや尺側に傾いており、そのため橈屈に比べ、尺屈がより可能となっている。また、握り拳を作り、正面からみると骨頭の背側は幅狭く、掌側は幅広い。また、骨頭は側面からみて前後には短く、掌背側には長い。従って、MP 関節屈曲位では、側副靭帯は緊張する。逆に、MP 関節伸展位では靭帯は弛緩する。従って、MP 関節伸展位では、指を扇のように広げることが可能であるが、MP 関節屈曲位では指を広げることが不可能である。

## 3. ロボットの手の設計の指針

人の手の仕組みを踏まえ、RoboBio-X Origin 用の手の設計指針を以下のように定める。

### 3.1. 骨格系

手根部と第 2~5 指の中手骨部は一体とする。但し、第 2~5 指の中手指(MP)関節は橈側一尺側方向にスライド可能で、更に薬指と小指の中手指(MP)関節は手背側一手掌側方向にもスライド可能な構造とする。(スライド範囲は別途定める。) 指の骨格構造にクローズドループ構造は用いない。

母指：

手根中手(CM)関節は屈曲/伸展(橈側外転一尺骨内転と掌側外転一掌側内転)と旋回の 3 自由度を持たせる。

但し、旋回は駆動系を用いず、母指の腹が掌と平行になる方向に弾力性を持ってねじれる構造とする。

中手指(MP)関節、指節間(IP)関節は屈曲/伸展の 1 自由度を持たせる。

第 2~5 指：

手根中手(CM)関節：

第 2, 3 指は外転/内転の 1 自由度、第 4, 5 指は屈曲/伸展方向の自由度を加えて 2 自由度を持たせる。

中手指(MP)関節、近位指節(PIP)関節、遠位指節(DIP)関節は屈曲/伸展の 1 自由度を持たせる。

### 3.2. 駆動系

手の関節を駆動する動力源は前腕部に配置し、駆動ワイヤー(アウターチューブ+ボールチェーン)で動力伝達する。

母指：

手根中手(CM)関節：

屈曲/伸展：モータ+減速機×2、駆動ワイヤー×2 セット

中手指(MP)関節と指節間(IP)関節：

屈曲/伸展：モータ+減速機×1、駆動ワイヤー×1 セット、駆動バンド×4



## 第 2~5 指：

手根中手(CM)関節：

外転/内転：モータ+減速機×1、駆動ワイヤー×1 セット

屈曲/伸展：モータ+減速機×1、駆動ワイヤー×1 セット（第 4,5 指連動）

中手指(MP)関節：

屈曲/伸展：モータ+減速機×4、駆動ワイヤー×4 セット

近位指節(PIP)関節、遠位指節(DIP)関節：

屈曲/伸展：モータ+減速機×4、駆動ワイヤー×4 セット、駆動バンド×4×4

## 4. おわりに

手の仕組みは非常に複雑であるが、その複雑さゆえに繊細な動作を可能にしていることが分かった。特にスムーズな動きを実現するには、動作開始と停止時に動作と反対方向の力が適度にブレーキとして働く事が重要であるように思われる。

「ロボットの手の設計の指針」については、クローズドループ構造を用いない構造としたが、今後、設計を進めると変更になる可能性がある。(本資料は開発の記録とする為、誤り以外の記載の修正は行わない。)

## 参照資料

The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine(Online ISSN : 1881-8560/Print ISSN : 1881-3526)

特集『リハ専門医が知っておくべき骨関節の 3 次元動態』

手指関節のバイオメカニクス

著者 片岡 利行

日本義肢装具学会誌(Vol. 15 No. 3 1999)

生体をもっと知ろう—義肢装具士のための生体機構学—

手・上肢筋 の機能解剖

著者 池田和夫

[ナースフル](https://nurseful.jp/)の『[第 1 章 骨・神経・骨格筋の解剖と働き](#)』(https://nurseful.jp/)

[フィットネスの勧め](http://www.i-l-fitness-jp.com/)の『[解剖学\(Anatomy\)](#)』(http://www.i-l-fitness-jp.com/)