# 外骨格機構用の回転関節機構 — 迂回ジョイント(Circuitous joint) — の研究開発

2006年2月10日

科学技術振興事業団 戦略的基礎研究推進事業(CREST) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 舘研究室 元ポストドクター研究員 (2001.4~2003.3)

川渕 一郎

(ichiro\_kawabuchi@kuramae.ne.jp)

## 目次

1	緒言1
2	原理機構
2.1	2 重ラック&ピニオン機構
2.2	理想的なラックとピニオンの形状7
2.3	実用的なラックとピニオンの形状
2.4	駆動方法13
2.5	ラックの逆配置15
3	迂回ジョイントの駆動に関する計算式 16
3.1	単一迂回ジョイント16
3.2	連続迂回ジョイント18
3.3	実用機構モデル
4	実用機構の設計と構造
4.1	基礎的な機構諸元
4.2	圧縮バネの設計方法24
4.3	モータの選定方法
4.4	関節ユニットの連結方法
4.5	スライダ機構の構造29
<b>5</b>	バイラテラル制御実験 31
5.1	マスター機構
5.2	スレーブフィンガ
5.3	バイラテラル制御方法
5.4	マスター機構のセンサ34
5.5	実験結果
6	結言
7	あとがき (蛇足駄文)

## 1 緒言

バーチャルリアリティ(人工現実感)研究に供されるインターフェイス装置の一種として, 人体へ服のように被せて装着する機械があり外骨格機構と呼ばれる.その主たる用途は次 の通りである.まず,内部の人間の運動へ追従するように外骨格機構を運動させる事で, その人間の運動を計測したり,その人間が使用する操縦スイッチやディスプレイなどの機 器をその人間へ負荷を与えずに適切な位置で保持したりすることが可能となる.逆に,内 部の人間の運動を拘束するように外骨格機構を運動させる事で,その人間へいろいろな大 きさと方向の力の感覚を提示したりすることもできる.

人間へ力の感覚を提示する方法として,力を与える場合のみ機械と人間を接触させる方 式は特に「遭遇型」と呼ばれる.本方式は,人間に接触/非接触の明白な判断を与える点, 指先で軽く物を打つなどの軽い衝突感覚を実現する点,非接触時の身体の拘束感覚を零と する点などの利点によって,力覚提示方法として最も優れていると考えられる.

外骨格機構以外の形式の装置,例えば人間の傍に設置されたロボットアームでも同様の 機能を実現できるが,人体と干渉せずに充分な運動範囲を実現するためには,その規模を 人間と比して大幅に大きくしなければならない.よって,人間の運動範囲を出来る限り拘 束しないコンパクトな装置として,服のように常時人間の体表の近辺において一緒に運動 する外骨格機構が有望である.

さて、そのような外骨格機構を実現するためには、そのキーデバイスである回転関節機構の開発において次に述べる難題を解決する必要がある.なお先に断わるが、本研究開発では1自由度回転関節機構のみを対象とする.人体の肩関節、股関節、親指の付け根関節などの、多自由度関節に対応する機構は基礎的な1自由度回転関節の組み合わせにより実現可能と考えて、一つの構造で多自由度を実現する多自由度機構をここでは検討しない.

まず必須条件として外骨格機構が人体を侵襲してはならないので、その構造部材が人体 の外側に配置される必要がある.同時に、その構造部材の運動が人体の運動と一致するた めに、関節機構の回転軸と人体関節の回転軸が出来る限り同軸になることが求められる. ところが人体関節の回転軸がその人体内部に存在するから、先の二つの条件を両立するた めには、関節機構の回転軸はその構造部材が存在しない空中に位置しなければならない場 合が生ずる.すなわち、空中にバーチャルな回転軸を有する関節機構が必要となる.さら に、その回転関節機構は可動角が充分大きく、小形軽量であり、剛性が充分であり、モー タなどのアクチュエータによる駆動が容易でなくてはならないなど、多くの条件を満足し なくてはならない.

一般の回転関節機構の構造は回転軸と軸受から成り立つものであり、小形軽量で扱いや すいが実体の回転軸が存在する.そのため、人体の関節に対応する配置を試みた場合、先 の二つの条件を両立することが不可能であるか、それらを満足しても人体の他の部分に対 する障害物になるという大きな問題を生ずる場合が多い.Fig.1.1の(1)と(2)に、一般の回転

1

関節機構のための2種類の代表的な配置法を示す.(1)人体と機構の両回転軸を平行に配置 する場合,関節角変位θが大きいと人体と機構が衝突するため,おおよそ45度より大きな 可動角が得られない.人体の関節のほぼ全てがそれ以上回転するから,この配置法の適用 先はかなり限られる.(2)人体と機構の両回転軸を同軸状態に配置する方法は,先の二つの 条件を両立するから人体の大部分の関節に適用可能である.ただし,関節軸の延長線上に 構造部材が位置するため,その配置空間が存在しない関節へは適用できない.例えば,手 指への適用が出来ない.さらに,肘や膝などの大きな配置空間が得られる関節へ適用する 場合でも,人体の横に張り出して配置された機構が,手や腕の運動の大きな邪魔物となる 可能性が高い.関節機構の存在が最も邪魔になりにくい配置場所は,(1)の場合と同じ人体 の関節が曲がる方向と逆の位置,かつ極力人体表面に近い空間と考えられる.

そこで本研究開発では、外骨格機構へ適する回転関節機構の新しい候補として、その構造部材が人体の関節が曲がる方向と逆の空間内に人体に近接して配置され、かつ人体関節の回転軸と一致するバーチャルな回転軸を有する関節機構を提案する.そして、この機構を「迂回ジョイント(Circuitous joint)」と呼び、その概念を Fig.1.1 の(3)に示す.



Fig.1.1 Typical 3 types of rotary joint for an exoskeleton mechanism

同図を用いて迂回ジョイントの基礎的な機能を説明する. 迂回ジョイントで連結された 節 A と節 B を人体の上側にオフセット距離 p だけ離して配置する. オフセット距離 p の定 義は,機構の節の中心線と人間の骨の中心線との間の距離である. 人体の関節の曲がりに 応じて節 A に対して節 B が回転する際,両者の連結部分が回転すると同時に伸びる. ここ で,関節が大きく回転しても,節 A と骨 A,および節 B と骨 B それぞれの間のオフセット 距離 pが一定に保たれるように伸びの長さsが与えられれば機構と人体の間の接触が生じな い. そこで,節 A と節 B 間の相対的な回転中心が人体関節の回転軸と一致するように,そ の角変位 $\theta$ と伸びの長さsの適切な変化の関係を創生することが,迂回ジョイントの基礎的 な機能となる.

本論文では、この迂回ジョイントの構造や特性を具体的に解説し、さらにそれを適用した実際の外骨格機構について有用性を確認する.

#### 2 原理機構

迂回ジョイントの原理的な機能を実現するモデルを「原理機構」と呼び,本章ではその 構造や駆動原理を説明する.

#### 2.1 2重ラック&ピニオン機構

二つの節の連結部分が回転かつ伸縮する運動を創生する機械要素として、構造の単純さ、 運動の確実性、剛性の高さ、および製作の容易さなどの観点から、ラックとピニオンから なるラック&ピニオン機構を採用する.一方の節にラックを固定し、他方の節にピニオン を固定する.ラックに対してピニオンが回転しながら移動する直線運動が、ラックが付い た節の伸縮運動に相当する.他方の節も同時に伸縮運動しなくてはならないから、同形状 のラック&ピニオン機構を逆向きに付加してその運動を創生する.従って、原理機構はラ ック&ピニオン機構を2 重に用いることになる.

Fig.2.1 の(1)に原理機構の全体像を,同(2)にその分解状態を示す. さらに,その運動状態 を分かり易く説明するために,同(3)に示すように,2重のラック&ピニオン機構を上下に 並べた側面図を用いることにする.

部品構成を説明する. ラック1と扇形ピニオン1, およびラック2と扇形ピニオン2がそ れぞれラック&ピニオン機構を構成する. ピニオンを扇形状とするのは,不要な歯が付く 部分を取り除くことにより機構の小形軽量化を図るためである. 前者のラック&ピニオン 機構により節Aの伸縮運動が創生され,後者のそれにより節Bの伸縮運動が創生される. 扇形ピニオン1は節Bと同じ角変位だけ回転し,かつ節Bの伸縮運動を妨げてはならない. そこで,扇形ピニオン1が節Bの伸縮方向に自由な直線運動を行うように,両者はスロッ トとボスからなる直動案内を介して勘合される. 同様に,扇形ピニオン2と節Aは直動案 内を介して勘合される.

本原理機構は機構学において過拘束機構(計算上の自由度が0以下であって、通常なら動 かないはずの機構)と呼ばれるものであり、これが可動となるのは二つの扇形ピニオンの中 心軸が一致する場合のみである.逆に言えば、両ピニオンの中心を貫通する実体のある中 心軸がなくても、両ピニオンの中心軸を一致させる力が自然に発生する.この特性は次の 運動結果を生む.扇形ピニオン1と節B間の自由な直線運動の変位は、ラック2と扇形ピニ オン2により創生される節B上の伸長変位sと一致するように拘束される.同様に、扇形ピ ニオン2と節A間の自由な直線運動の変位は、ラック1と扇形ピニオン1により創生される 節A上の伸長変位sと一致するように拘束される.参考のために、Fig.2.2 に運動状態の遷移 を示す.また、二つの扇形ピニオンの中心を貫通する実体のある中心軸が仮に抜かれても、 計算上の自由度が1となるだけであって、運動機能には変化が生じない.ただし、機構の 剛性を増し、後述するプーリの軸として用いるのに便利であるから、実用の迂回ジョイン ト機構においてはその中心軸を与える方が合理的である.

4



Fig.2.1 The fundamental mechanism



Fig.2.2 A mixed motion of rotating and extending in the circuitous joint

#### 2.2 理想的なラックとピニオンの形状

あらゆる角変位θにおいて迂回ジョイントが実現するバーチャルな回転軸と人体関節の 回転軸とが一致するためには、角変位θがより大きい状態では伸長変位 s のθに対する変化 率もより大きくなるべきである.このことは、Fig.2.1 と Fig.2.2 で示したような直線のラ ックと円形のピニオンを用いてラック&ピニオン機構を構成することが出来ないことを意 味する.なぜなら、そのようなラック&ピニオン機構では伸長変位 s のθに対する変化率が θの大きさに関わらず一定だからである.

バーチャルな回転軸が人体関節の回転軸と常時一致するために必要なラックとピニオン の形状を計算で求めると、Fig.2.3の(3)に示す複雑な輪郭形状のものとなる.これらの製作 が困難であるばかりでなく、ラックとピニオンが人体の方に大きく伸びることでそれらの 干渉が起こり易くなるから、この形状の迂回ジョイント機構を外骨格機構へ採用すること も困難である.ただし、適用対象によってはこの迂回ジョイントが利用できる可能性があ る.そこで、この迂回ジョイントを理想的なそれとみなし、本節ではその理想的な歯車形 状の計算式を説明する.なおここで示す計算式は一例であり、式が出来るだけ単純になる ための付加的な条件として、「角変位 θ=0 の時に、ラックとピニオンの接点 E は Y軸上に 位置すること」を追加して導いたものである.

ラックとピニオンの接点 E の位置は, Fig.2.3 の(1)に示すように作図により簡単に求めら れる. バーチャルな回転軸 C を通り Y軸に対して角度 $\theta/2$ を有する直線と, X 軸との交点 がピニオンの中心軸 J となる. さらに, その J を通り Y軸に平行な直線と, C を通り Y軸 に対して角度 $\theta$ を有する直線との交点が, ラックとピニオンの接点 E となる. |CE|および |JE|がそれぞれラックおよびピニオンの半径となる. また $\triangle$ CEJ が二等辺三角形であり, すなわち|CE|=|JE|だからラックとピニオンの輪郭は同形状になる. ラックとピニオンの 半径を  $r(\theta)$ と表記すると, |OC|が次式のように 2 種類の表現で表される.

$$|OC| = p = r(\theta) + r(\theta) \cdot \cos\theta \tag{2.1}$$

これを変形して、r(θ)の計算式が次式として得られる.

$$r(\theta) = \frac{p}{1 + \cos\theta} \tag{2.2}$$

そして、この形状を有するピニオンの形状の例が Fig.2.3 の(2)となり、この歯車を用いた 迂回ジョイントの全体像が Fig.2.3 の(3)となる.



(1) Drawing of the ideal contour of the gear



(2) Example of the sector pinion



(3) Construction of the ideal circuitous joint

Fig.2.3 An ideal contour of the rack and pinion gears

#### 2.3 実用的なラックとピニオンの形状

結論を先に述べるが、数値解析の結果より次のことが判明する. Fig.2.1 と Fig.2.2 で示 したような直線のラックと円形のピニオンを用いて迂回ジョイントを構成した場合でも、 バーチャルな回転軸と人体関節の回転軸とを実用上問題とならない程度の誤差内に一致さ せることが可能である.そこで、実用性を重視して、今後は直線のラックと円形のピニオ ンを採用する.本節では、そのラックとピニオンの最適形状の計算方法を説明する.ラッ クとピニオンの形状を代表する値は、ピニオンのピッチ円半径 r のみである.よって、そ の半径 r の最適値を求めることにする.

まず,ここで用いられる諸元を Fig.2.4 にまとめて示す. 各記号の定義は下記の通りである.

- A 節 B 上の基準点
- C 骨 B の回転中心点
- D 節 B の回転運動の瞬間中心 (Instantaneous Center)
- E 骨 B 上の基準点
- a 骨 B と節 B の基準長さ.計算結果に影響しないので任意の値で良い
- p 節の中心線と、骨の中心線との間のオフセット距離
- r ピニオンのピッチ円半径
- s 伸長変位
- u 基準点AとEとの間の距離の,節の長手方向の成分
- v 基準点AとEとの間の距離の、節の長手方向に対して垂直な方向の成分
- *θ* 関節角変位 (Joint Angular Displacement)

節 B の瞬間中心 D が機構のバーチャルな回転軸に相当する.理想的には点 D が点 C の 位置に静止すべきだが,直線のラックと円形のピニオンを用いた迂回ジョイント機構では, 先述したとおり角変位θに応じて移動する.その様子を Fig.2.5 に示す.伸長変位 *s* と,点 D と原点 O との間の距離|OD|は,それぞれ次式で得られる.



Fig.2.4 Definition of parameters

$$s = r\theta \tag{2.3}$$

$$|OD| = s / \tan(\theta / 2) \tag{2.4}$$

Fig.2.5 の(2)が示すとおり、ピニオンのピッチ円半径 r の違いによって、点 C に対する点 Dの運動が3種類に分類できる.そして、点Dをできるだけ点Cの近傍に位置させる観点 より, 点 D の運動範囲が点 C をまたぐ場合が適切なので, 半径 r の値を次式で示す範囲内 とすべきことが分かる.

$$0.5p \le r \le (2/\pi)p \tag{2.5}$$

半径rの最適値を次のように求めることにする. 骨Bと節Bが共に角変位 $\theta$ だけ回転した際 の、それぞれの先端の基準点AとEとの間の距離の偏差を評価量とし、記号dで表す. その距 離の長手向成分をu, それに垂直な方向の成分をvとする. 角変位 $\theta$ が0のときu=0, v = pとなる. そして, 角変位 $\theta$ が0から増加する際に点Aと点E 間の距離の偏差dが最も小 さく抑えられる半径rの値を最適解とみなす.

u, v および d の計算式は次の通りである.

$$u = -r\theta\cos\theta + p\sin\theta - r\theta, \quad v = p\cos\theta + r\theta\sin\theta \tag{2.6}$$

$$d = \sqrt{u^2 + (p - v)^2} \tag{2.7}$$



(1) Position of instantaneous center D





式(2.7)へ(2.6)を代入すると、次式を得る.

$$d = \sqrt{2(r^2\theta^2 - p^2)\cos\theta - 4r\theta p\sin\theta + 2r^2\theta^2 + 2p^2}$$
(2.8)

u, vおよびdの,角変位 $\theta$ と半径rに対する変化をFig.2.6に示す.なお、計算値の評価 を一般化するために,u, v, dおよびrの各値はそれぞれがpで割られた無次元数として扱う.

同図においてピニオンの半径 r を変えて製作された dの曲線を観察することにより,角変 位 $\theta$ の可動域内おける dの最大値が最も小さく抑えられる半径 rの値を特定することができ る.例えば,角変位 $\theta$ の可動域が  $0 \le \theta \le \pi/2$ の場合,

r = 0.593 p

(2.9)

とすれば偏差 d の最大値が 0.095 p に抑えられる.



Fig.2.6 Variation of the deviations

11

また,角変位 $\theta$ の可動域が $0 \le \theta \le \pi/3$ の場合,

r = 0.537 p

とすれば偏差 d の最大値が 0.029 p に抑えられる.

人間の手指へ適用される迂回ジョイントでは、角変位 $\theta$ の一般的な可動域がおおよそ  $0 \le \theta \le \pi/2$ であり、一般的なオフセット距離 p がおおよそ 10mm となるので、偏差 d の最 大値がおおよそ 1mm となる、人間の指の運動精度と比較して、この誤差の量は同程度かつ 許容できる程度に小さいと考えられる。従って、直線のラックと円形のピニオンを用いた 迂回ジョイント機構には十分な実用性がある。

(2.10)

#### 2.4 駆動方法

迂回ジョイントが実現する運動は、回転運動と直線運動の二つの運動成分から成る合成 運動である.そこで、それを駆動するための動力伝達機構を極力単純にする観点から、駆 動方法について、回転運動成分のみを制御する方法と、直線運動成分のみを制御する方法 の2種類が考えられる.一般のモータを動力源として用いる場合、回転動力にマッチする 前者の方法が適当であると考えられやすい.しかしながら、関節近傍にモータや減速機を 配置することは、関節の大形化、重量増大を招くから、避けることが望ましい場合が多い. そこで、遠隔に配置されたモータで引かれるワイヤロープを動力伝達機構として活用する ことにより、本関節機構における直線運動成分を制御する駆動方法を提案する.

**Fig.2.7**に原理機構におけるワイヤロープの張り方を示す.二つの扇形ピニオンの中心軸 に付加したプーリにワイヤロープを掛け渡し,その左右の部分を両側の節の伸縮方向に伸 ばす.一方の節上にドラムとそれを回転させるモータを配置して,ワイヤロープの一端を 巻き取る.他方の節上にワイヤロープのもう一端を固定する.ドラムでワイヤロープを巻 き取って張力を与えると,角変位θが小さくなる方向に迂回ジョイントが駆動される.この ワイヤロープでは,それぞれの節が伸びる力を発生させることが不可能なため,角変位θ が大きくなる方向に迂回ジョイントを駆動することが出来ない.そこで,二つの扇形ピニ オンの中心軸を節が伸びる方向に押す圧縮バネを付加する.まとめると,本関節機構は,



Fig.2.7 A driving method pulling a wire rope

角変位θが大きくなる方向の力が圧縮バネによって与えられ,角変位θが小さく方向の力が ワイヤロープの張力により与えられて,駆動されることになる.以上より,関節近傍の動 力伝達機構が,細いワイヤロープ,小さなプーリ,および圧縮バネのみであるため,本関 節機構の最大限の小形軽量化が可能となる.

ワイヤロープを用いた本駆動方法には、さらに別の大きな利点がある.複数の迂回ジョ イントが直列に連続する機構において、ある関節機構を駆動するためのワイヤロープを、 別の関節機構を経由して引き伸ばすことが容易である.Fig.2.8 に具体例を示す.三つの関 節機構を駆動するための3本のワイヤロープ全てが、根元の節上に設けられたドラムまで 引き伸ばされている.このため、比較的大きくて重いドラムとモータを邪魔となりにくい 位置に自由に配置することが可能である.また、一つのドラムで複数のワイヤロープを巻 き取ることにより、複数の関節機構を連動して駆動することが出来る.関節間の運動比率 は、ロープ毎にドラム半径を決めることで設定可能である.さらに、根元の関節は一般的 に大きな駆動力を必要とするが、それは通過している全ワイヤロープの張力の和として関 節に与えられるため、個々のワイヤロープに必要な張力の負担が緩和される.その張力な ど、駆動のための制御量の計算方法については、第3章で詳細に述べる.



Fig.2.8 A coupled driving method of serial joints

#### 2.5 ラックの逆配置

Fig.2.8 から明らかなとおり、これまでに示した原理機構のモデルはそのラックが人体と 干渉しており、外骨格機構に適用するには問題がある.人体と関節機構との間の空間的余 裕の大きさは、人体と機構の間のオフセット距離pと扇形ピニオンのピッチ円半径rとの差 の大きさに大きく依存する.他方で、式(2.5)で示したように、両者の比r/pの適切な値には、  $0.5 \leq r/p \leq 2/\pi$ という設定範囲が存在する.従って、人体と関節機構との間の空間的余裕を 大きくするためにオフセット距離pを大きくしても、それに比例して扇形ピニオンのピッ チ円半径rも大きくなる.このことは、ラックと人体を干渉させないためには、機構の規模 を実用性が失われる程度まで大きくしなければならないことを意味している.そこで、根 本的な問題解決策として、ラックを扇形ピニオンから見て逆の方向に配置することにする. Fig.2.9 に逆に配置したラックと扇形ピニオンを示す.ラック&ピニオン機構の作用による それぞれの節の伸縮方向を適切なものとするために、ラックと扇形ピニオンの間に小さな 反転歯車を付加する.なお、反転歯車の中心は、扇形ピニオンの中心からラックに下ろし た垂線上に常に保持されるものとする.反転歯車の付加による機構の多少の大形化は人体 に接触しない方向に付加されるため、実用上の問題とならない.



Fig.2.9 Additional reverse gears

## 3 迂回ジョイントの駆動に関する計算式

#### 3.1 単一迂回ジョイント

まず、単一の迂回ジョイントの駆動に関する計算式を述べる. Fig.3.1 に迂回ジョイントのモデルと、それに関する量を示す. 各記号の定義は次の通りである. なお、関節番号 *j*は不要の場合に省略されることがある. 機構の摩擦は十分に小さいと考えて無視する.

- *j* 関節番号 (Joint Number)
- *θ*<sub>j</sub> 関節角変位 (Joint Angular Displacement)
- *sj* 関節伸長変位 (Joint Stretching Displacement)
- r<sub>j</sub> 円弧ピニオンのピッチ円半径 (Radius of Pitch Circle of the Sector Pinion)
- rp ロープ用プーリ半径 (Radius of the Rope Pulley) (全関節共通値とする)
- k1,j 圧縮バネ1のバネ定数 (Spring Constant of the Compression Spring 1)
- k2,j 圧縮バネ2のバネ定数 (Spring Constant of the Compression Spring 2)
- τj 関節を駆動するのに必要なトルク (Joint Torque)
- $F_j$  ロープ張力 (Rope Tension)
- *wj* ロープ繰り出し長 (Rope Stretch)
- Fs1, j 圧縮バネ1の発生力 (Spring Force of the Compression Spring 1)
- Fs2, j 圧縮バネ2の発生力 (Spring Force of the Compression Spring 2)
- $F'_{s1,j}$  圧縮バネ1の $\theta_j = 0$ 時の発生力

(Spring Force of the Compression Spring 1 when  $\theta_j = 0$ )

*F*'s2, *j* 圧縮バネ2の*θj* = 0時の発生力

(Spring Force of the Compression Spring 2 when  $\theta_j = 0$ )

関節伸長変位  $s_j$ , ロープ繰り出し長  $w_j$  それぞれと関節角変位  $\theta_j$ の関係は幾何学的に単純であり、その関係式は次の通りである.



Fig.3.1 Relationship between the rope tension and the joint torque

$$s_j = r_j \cdot \theta_j \tag{3.1}$$
$$w_j = 2 s_j + r_p \cdot \theta_j \tag{3.2}$$

ロープ張力  $F_j$ と関節トルク $\tau_j$ の関係式は、エネルギ保存則に基づいて次のように求められる.まず、関節角変位が $\theta_j$ から0まで変化する過程における、ロープ張力  $F_j$ がする仕事、関節トルク $\tau_j$ がする仕事、圧縮バネ1と2が吸収するエネルギはそれぞれ次の通りである.

ロープ張力 F<sub>j</sub>がする仕事 F<sub>j</sub>・w<sub>j</sub>
 関節トルク τ<sub>j</sub>がする仕事 τ<sub>j</sub>・θ<sub>j</sub>
 圧縮バネ1 が吸収するエネルギ F's1, j ⋅ s<sub>j</sub> - k1, j ⋅ s<sub>j</sub><sup>2</sup>/2
 圧縮バネ2 が吸収するエネルギ F's2, j ⋅ s<sub>j</sub> - k2, j ⋅ s<sub>j</sub><sup>2</sup>/2

ここで, 圧縮バネが吸収するエネルギは, Fig.3.2 に示される斜線の面積に相当する. これらをエネルギ保存則に基づいて組み合わせることにより, 次の方程式が得られる.

$$F_j \cdot w_j = \tau_j \cdot \theta_j + (F'_{s1, j} + F'_{s2, j})s_j - (k_{1, j} + k_{2, j})s_j^2 / 2$$
(3.3)

式(3.1)を用いて(3.2),(3.3)から sjを消去することにより、それぞれが次のように整理される.

$$w_j = (2 r_j + r_p)\theta_j \tag{3.4}$$

$$F_{j} = \frac{\tau_{j}}{2r_{j} + r_{p}} + \frac{(F'_{s1, j} + F'_{s2, j})r_{j}}{2r_{j} + r_{p}} - \frac{(k_{1, j} + k_{2, j})r_{j}^{2}}{2(2r_{j} + r_{p})}\theta_{j}$$
(3.5)

式(3.5)の右辺の第2,3項は圧縮バネに関するものである.従って,圧縮バネの影響を除け ば、ロープ張力と関節トルクが比例し、かつ関節角変位と無関係であることが分かる.す なわち、ロープを用いる本駆動方式の利点の一つとして、関節トルクの制御が極めて単純 なことが分かる.

以上の式(3.4),(3.5)を用いることで、関節角変位 $\theta_j$ および関節トルク $\tau_j$ が指定されたら、 その迂回ジョイントを駆動するための制御量として、繰り出し長 $w_j$ とロープ張力 $F_j$ が容易 に求められる.



Fig.3.2 Changing potential energy saved by a compression spring

#### 3.2 連続迂回ジョイント

複数の迂回ジョイントが連結されて構築された機構の駆動に関する計算式を述べる.ここでは、三つの迂回ジョイントが直列に接続された外骨格機構を具体例として説明を進める. その機構モデルを Fig.3.3 に示す. 各関節の中心点を  $J_j$ , 各節の重心および質量を  $m_j$ , 重 カベクトルを  $\vec{G}$  で表す.

根元から *j* 番目の関節における関節トルク *tj*を求める計算式には,そこを通るロープ張力 に基づくものと,指先の点 T に作用する外力 *F*r や機構の重力によって生ずるモーメントに 基づくものの 2 種類がある.前者は,式(3.5)を変形して次式となる.

$$\tau_{j} = \sum_{m=j}^{3} \left\{ F_{m}(2r_{j} + r_{p}) \right\} - (F'_{s1, j} + F'_{s2, j})r_{j} + (k_{1, j} + k_{2, j})r_{j}^{2}\theta_{j} / 2 \qquad \{j = 1, 2, 3\}$$
(3.6)

後者は、関節トルク $\tau_j$ と、外力 Frや機構の重力によって生ずるモーメントとの釣合いに 基づいて次式となる.なお以後における数式表現の単純化のために、ベクトルを機構の運 動平面である XY 平面上の 2 次元ベクトルに限定する.そして、例えば $\vec{A} \times \vec{B}$ によって表 される外積計算の結果をスカラー量として扱うことにする.また、例えば中心点  $J_j$ と重心  $m_j$ の間を結ぶ位置ベクトルを $\overline{J_j m_j}$ と表記することにする.

$$\tau_j = \overrightarrow{\mathbf{J}_j \mathbf{T}} \times \overrightarrow{F_{\mathbf{T}}} + \sum_{\mathbf{m}=j}^{3} (\overrightarrow{\mathbf{J}_j \mathbf{m}_{\mathbf{m}}} \times m_{\mathbf{m}} \overrightarrow{\mathbf{G}}) \quad \{j = 1, 2, 3\}$$
(3.7)



Fig.3.3 Equilibrium of forces on the master finger mechanism

式(3.6),(3.7)からなを消去することにより、次の3連立方程式を得る.

$$\begin{cases} (F_{1} + F_{2} + F_{3})(2r_{1} + r_{p}) - (F'_{s1,1} + F'_{s2,1})r_{1} + (k_{1,1} + k_{2,1})r_{1}^{2}\theta_{1}/2 \\ = \overline{J_{1}T} \times \overline{F_{T}} + \overline{J_{1}m_{1}} \times m_{1}\vec{G} + \overline{J_{1}m_{2}} \times m_{2}\vec{G} + \overline{J_{1}m_{3}} \times m_{3}\vec{G} \\ (F_{2} + F_{3})(2r_{2} + r_{p}) - (F'_{s1,2} + F'_{s2,2})r_{2} + (k_{1,2} + k_{2,2})r_{2}^{2}\theta_{2}/2 \\ = \overline{J_{2}T} \times \overline{F_{T}} + \overline{J_{2}m_{2}} \times m_{2}\vec{G} + \overline{J_{2}m_{3}} \times m_{3}\vec{G} \\ F_{3}(2r_{3} + r_{p}) - (F'_{s1,3} + F'_{s2,3})r_{3} + (k_{1,3} + k_{2,3})r_{3}^{2}\theta_{3}/2 \\ = \overline{J_{3}T} \times \overline{F_{T}} + \overline{J_{3}m_{3}} \times m_{3}\vec{G} \end{cases}$$
(3.8)

これを解いてロープ張力について整理すると、次の計算式を得る.

$$\begin{cases} F_{3} = \begin{cases} \overrightarrow{J_{3}T} \times \overrightarrow{F_{T}} + \overrightarrow{J_{3}m_{3}} \times m_{3}\overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,3} + F'_{s2,3})r_{3} - (k_{1,3} + k_{2,3})r_{3}^{2}\theta_{3}/2 \end{cases} / (2r_{3} + r_{p}) \\ F_{2} = \begin{cases} \overrightarrow{J_{2}T} \times \overrightarrow{F_{T}} + \overrightarrow{J_{2}m_{2}} \times m_{2}\overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_{2}m_{3}} \times m_{3}\overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,2} + F'_{s2,2})r_{2} - (k_{1,2} + k_{2,2})r_{2}^{2}\theta_{2}/2 \end{cases} / (2r_{2} + r_{p}) - F_{3} \\ F_{1} = \begin{cases} \overrightarrow{J_{1}T} \times \overrightarrow{F_{T}} + \overrightarrow{J_{1}m_{1}} \times m_{1}\overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_{1}m_{2}} \times m_{2}\overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_{1}m_{3}} \times m_{3}\overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,1} + F'_{s2,1})r_{1} - (k_{1,1} + k_{2,1})r_{1}^{2}\theta_{1}/2 \\ / (2r_{1} + r_{p}) - F_{2} - F_{3} \end{cases}$$
(3.9)

また、式(3.4)から、各ロープを繰り出す長さは次式で求められる.

$$\begin{cases} w_1 = (2r_1 + r_p)\theta_1 \\ w_2 = (2r_2 + r_p)\theta_2 + w_1 \\ w_3 = (2r_3 + r_p)\theta_3 + w_2 \end{cases}$$
(3.10)

以上より,機構の姿勢(Configuration)を規定する角変位  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  と,指先に作用する外力 Fr が指定されたら,機構を駆動するための必要な制御量であるロープ張力と繰り出し長が式(3.9),(3.10)から容易に求められる.

#### 3.3 実用機構モデル

これまで解析に用いてきた機構モデルよりもさらに実用機構に近いモデルについて、駆動に関する量の計算方法を説明する.

次章で説明する実用機構は、構造と制御の単純化のために、Fig.2.8 に示したように機構の運動自由度が1となっている。そこで、三つの角変位 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は次の比率で運動するものとする. u, vは定数である.

 $\theta_1 : \theta_2 : \theta_3 = 1 : u : v$ 

(3.11)

3本のロープを同時に巻き取るドラムを Fig.3.4 に示す. ドラムに関して新しく導入され る変数は次の通りである.

rD 第1関節を駆動するロープを巻き取るドラムの半径

τD ドラムを回転させるのに必要なトルク

θD ドラムの角変位

機構の長さに関する諸元を Fig.3.5 に示す.



Fig.3.4 Rope drum for the coupled driving method



Fig.3.5 Parameterts of the master finger mechanism

(C) Ichiro KAWABUCHI, 2001–2006 (ichiro\_kawabuchi@kuramae.ne.jp) 各記号の定義は次の通りである.

~

bj 各節上の重心位置

まず,式(3.10)に式(3.11)を代入することで,次式を得る.

$$\begin{cases}
w_1 = (2r_1 + r_p)\theta_1 \\
w_2 = (2r_2 + r_p)u\theta_1 + w_1 \\
w_3 = (2r_3 + r_p)v\theta_1 + w_2
\end{cases}$$
(3.12)

それぞれのロープを巻き取るドラム半径は,式(3.12)に示されるロープ繰り出し長さ *wj* に比例する.また,第1関節を駆動するロープを巻き取るドラムの半径を基準とみなして それを *r*D で表すことにしたから,ドラムを回転させるのに必要なトルクτD は次式で計算 される.

$$\tau_{\rm D} = \left(F_1 + \frac{(2r_1 + r_{\rm p}) + (2r_2 + r_{\rm p})u}{(2r_1 + r_{\rm p})}F_2 + \frac{(2r_1 + r_{\rm p}) + (2r_2 + r_{\rm p})u + (2r_3 + r_{\rm p})v}{(2r_1 + r_{\rm p})}F_3\right)r_{\rm D}$$
(3.13)

さらにこれへ式(3.9)を代入すると、τDの計算式は次のように整理される.

$$\tau D = \left[ \begin{cases} \overrightarrow{J_1 T} \times \overrightarrow{FT} + \overrightarrow{J_1 m_1} \times m_1 \overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_1 m_2} \times m_2 \overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_1 m_3} \times m_3 \overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,1} + F'_{s2,1})r_1 - (k_{1,1} + k_{2,1})r_1^2 \theta_1 / 2 \end{cases} + u \begin{cases} \overrightarrow{J_2 T} \times \overrightarrow{FT} + \overrightarrow{J_2 m_2} \times m_2 \overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_2 m_3} \times m_3 \overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,2} + F'_{s2,2})r_2 - (k_{1,2} + k_{2,2})r_2^2 u \theta_1 / 2 \end{cases} \right]$$

$$+ v \begin{cases} \overrightarrow{J_3 T} \times \overrightarrow{FT} + \overrightarrow{J_3 m_3} \times m_3 \overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,3} + F'_{s2,3})r_3 - (k_{1,3} + k_{2,3})r_3^2 v \theta_1 / 2 \end{cases}$$

$$(3.14)$$

ドラムの角変位 *θ* D は次式で計算される.

$$\theta \mathbf{D} = (2r_1 + r_p)\theta_1/r_\mathbf{D} \tag{3.15}$$

以上より、角変位 $\theta$ Lと、指先に作用する外力 *F*T が指定されたら、機構を駆動するための 制御量として、ドラムの駆動トルク $\tau$ Dと角変位 $\theta$ D が式(3.14)、(3.15)から容易に得られる. なお、式(3.14)における各ベクトルは以下の計算式で与えられる.

21

$$\begin{aligned} \left(\overline{\mathbf{J}_{1}\mathbf{T}} = (r_{1}\cdot\theta_{1} + a_{1} + r_{2}\cdot u\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1})\\\sin(\theta_{1}) \end{pmatrix} + (r_{2}\cdot u\,\theta_{1} + a_{2} + r_{3}\cdot v\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ + (r_{3}\cdot v\,\theta_{1} + a_{3}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{J}_{1}m_{2}} = (r_{1}\cdot\theta_{1} + a_{1} + r_{2}\cdot u\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1})\\\sin(\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ + (r_{2}\cdot u\,\theta_{1} + b_{2}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{J}_{1}m_{3}} = (r_{1}\cdot\theta_{1} + a_{1} + r_{2}\cdot u\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1})\\\sin(\theta_{1}) \end{pmatrix} + (r_{2}\cdot u\,\theta_{1} + a_{2} + r_{3}\cdot v\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ + (r_{3}\cdot v\,\theta_{1} + b_{3}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{J}_{2}T} = (r_{2}\cdot u\,\theta_{1} + a_{2} + r_{3}\cdot v\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} + (r_{3}\cdot v\,\theta_{1} + a_{3}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{J}_{2}m_{3}} = (r_{2}\cdot u\,\theta_{1} + a_{2} + r_{3}\cdot v\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} + (r_{3}\cdot v\,\theta_{1} + b_{3}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{J}_{2}m_{3}} = (r_{2}\cdot u\,\theta_{1} + a_{2} + r_{3}\cdot v\,\theta_{1}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} + (r_{3}\cdot v\,\theta_{1} + b_{3}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{J}_{3}T} = (r_{3}\cdot v\,\theta_{1} + a_{3}) \begin{pmatrix} \cos(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1})\\\sin(\theta_{1} + u\,\theta_{1} + v\,\theta_{1}) \end{pmatrix} \\ (3.16) \end{aligned}$$

## 4 実用機構の設計と構造

本章では、迂回ジョイントの適用先として最も有用性が高く、かつ最も小さくて設計が 困難なので挑戦し甲斐があるから、人間の手指へ装着する外骨格機構を取り上げる.そし て、その実用機構ついて、設計指針と具体的な構造を説明する.なお、親指の根元関節の2 自由度運動へ適応する機能を本迂回ジョイントが実現できないので、親指に装着する機構 は別紙で改めて論ずることにする.

#### 4.1 基礎的な機構諸元

構造と制御の単純化のために、Fig.2.8 に示したように、機構の駆動形式を1自由度のワ イヤロープ駆動とする.人間の手指の3関節は独立に動くことが可能であるが、多くの運 動状況では近似的にそれらが連動しているとみなせると考える.そこで、人間の指が軽く 曲がった状態へ機構を沿わせることを想定して、式(3.11)で定義した各関節の角変位 $\theta_1$ 、  $\theta_2, \theta_3$ の比を次のように与える.

$$u = 1.5, v = 1$$
 (4.1)

さらに、それぞれの関節の運動角範囲を次のように与える.

機構の長さに関する主な諸元について,人間の手の大きさと対比させてそれらの値を次 のように与える.

$$a_1 = 0.050, a_2 = 0.030, a_3 = 0.015 \text{ [m]}$$
 (4.3)  
 $p = 0.012 \text{ [m]}$  (4.4)

すると、式(2.9),(2.10),(4.2)および(4.4)に基づいて、各迂回ジョイントのピニオンのピッ チ円半径が以下のように決まる.なお、ピニオンの歯のモジュールを 0.3 としたので、各ピ ッチ円半径はモジュールの値の 0.0003 [m]の倍数に修正されている.以後のシミュレーシ ョンでは、特に断わらない限りこれらの値を用いる.

$$\begin{cases} \hat{\pi} \ 1 \ \text{B}\hat{\text{m}} \ : r_1 = 0.537 \ p = 0.0063 \ [\text{m}] \\ \hat{\pi} \ 2 \ \text{B}\hat{\text{m}} \ : r_2 = 0.593 \ p = 0.0072 \ [\text{m}] \\ \hat{\pi} \ 3 \ \text{B}\hat{\text{m}} \ : r_3 = 0.537 \ p = 0.0063 \ [\text{m}] \end{cases}$$
(4.5)

#### 4.2 圧縮バネの設計方法

1

ロープ駆動機構を設計する際に考慮すべき最も重要な留意点は、ロープに過負荷が働か ないこと、およびロープ張力が負とならないことである. ロープ張力が負となっても問題 を生じない場合もあるが、ロープが緩むことによって外れたり、望まない部分に引っかか ったり易くなるので、出来る限りロープ張力が負となることを避けるべきである. 圧縮バ ネはそのロープ張力に大きな影響を及ぼすので、ロープ張力を適切にする観点から、適切 な圧縮バネの設計指針を導くことができる.

式(3.9)を用いてロープ張力を求めるために必要な残りの定数を,現実の機構を想定して 次のように仮定する.

$$\begin{cases} m_1 = 0.04, m_2 = 0.02, m_3 = 0.01 \text{ [kg]} \\ b_1 = 0.02, b_2 = 0.015, b_3 = 0.01, r_p = 0.0022 \text{ [m]} \\ k_{1,1} = k_{2,1} = 400, k_{1,2} = k_{2,2} = k_{1,3} = k_{2,3} = 200 \text{ [N/m]} \\ F'_{\text{s}1,1} = F'_{\text{s}2,1} = 6, F'_{\text{s}1,2} = F'_{\text{s}2,2} = 3, F'_{\text{s}1,3} = F'_{\text{s}2,3} = 1 \text{ [N]} \end{cases}$$
(4.6)

比較検討の単純化のため, Fig.3.5 に示したとおり,指先の点Tに作用する外力Frは末端の節の長手方向と常に直行することにする.また,外力Frの作用点を同図中のバーチャルな作用点Tとみなす.外力Frのベクトルは次式となる.

$$\vec{Fr} = Fr \begin{pmatrix} -\sin(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \\ \cos(\theta_1 + u\theta_1 + v\theta_1) \end{pmatrix}$$
(4.7)

機構に作用する重力は, Fig.3.5 に示したように Y軸の正方向の状態を基準とする.重力の向きもロープ張力に影響を与えるので,その変化の両極端となる状態として,重力ベクトルが Y 軸の正方向の場合と,負方向の場合の二つを検討する.それを表す重力ベクトルが次式で与えられる.

$$\vec{\mathbf{G}} = 9.81 \begin{pmatrix} 0\\ \pm 1 \end{pmatrix} \quad [\text{m/s}^2] \tag{4.8}$$

力Frの大きさを、0Nから 3Nまで 1N刻みで変化させた場合の、機構の曲げ角度に対する 各ロープ張力の変化をFig.4.1 に示す. なお、機構の曲げ角度の指標は、曲げ状態をイメー ジしやすいように、先端の節の姿勢角 $\theta_{1+}\theta_{2+}\theta_{3}$ を用いることにする. ロープ張力 $F_{1}$ の曲 線のみが、曲げ角度が大きくなるに従って大きく減少している. この原因は、機構の曲げ 角度が大きい状態では外力Frのベクトルの延長線と第 1 関節が近づくことになって、その 関節を駆動するのに必要な関節トルク $\tau_{1}$ も零に近づくからである.

24

カFrが,指先の発生力としては大き目と考えられる 3Nの場合でも,ロープ張力F1の最 大値は約 15Nであって極端に大きくないことがわかる.この程度の張力は,直径 0.5mm程 度の細くてしなやかなワイヤロープで十分に負担可能である.このようにロープ張力が適 度に抑制される原因は,2.4節で述べたとおり,ある関節を通過する全ロープの張力の総和 がその関節トルクに変換される長所にある.

次に, 圧縮バネの有無の効果を確認するために, 圧縮バネが存在せず, かつ外力が Fr = 3N の場合の結果を破線にて同図中に記入する. 圧縮バネを取り付けるとロープ張力が全可動 域において増えることがわかる. すなわち, 圧縮バネの効果はロープ張力が負になる問題 を改善することである. 他方で, 圧縮バネには次に述べる 2 種類の副作用もあるので注意 しなくてはならない.

まず,式(3.9)が示すとおり,より先端側の関節を駆動するロープの張力は,より根元側の関節を駆動するロープの張力を減ずる働きをする.そこで,仮に先端側の関節に強すぎる圧縮スプリングを取り付けてそれを駆動するロープの張力を上げすぎると,より根元側の関節を駆動するロープの張力が小さくなり過ぎたり,負になったりする恐れがある.



Fig.4.1 Change of the rope tensions

次に、全可動域においてロープ張力が負とならぬようにするためには、圧縮バネを極端 に強くしなくてはならない場合があり得る.それはロープ張力の最大値の極端な増加を招 くので、機構や駆動用モータの負担も大きくなる.

以上より, 圧縮バネの設計方法とは, ロープ張力のシミュレーションを繰り返して効果 と副作用の比較を確認しながら, 必要最小限の強さとなるように適切な諸元を探索するこ とである. 言い換えれば, ロープが緩む問題の大きさを勘案して, ロープ張力が時には負 になることへ妥協しつつ, 必要最小限の強さの圧縮バネを選択することである. 式(4.6)で 示した仮定値は, その探索を経て適切に調整された結果である. 以後のシミュレーション では, 特に断わらない限りそれらの値を用いる.

余談であるが,根元側の関節を駆動するロープの張力を意図的に 0 近傍となるように設計することにより,そのロープを廃止した機構とすることも考えられる.その場合は,根元側の関節の角変位を任意に制御することが不可能であるが,逆にその特性を生かす応用も考えられる.すなわち,根元側の関節が人間の指に大きな負担を与えずに任意に動くことが出来るので,外骨格機構として,人間の指への追従性がより向上する可能性が考えられる.この方法は検討に値すると思う.

#### 4.3 モータの選定方法

圧縮バネの設計が終わればロープ張力の具体値が確定するので、次のステップとして機構を駆動するモータを選定する.ただし、一般的にモータを既製品リストから選択することになるので、それには大きさ、形状、重さなど、任意に指定できない要素が多い.よって、モータの選定方法としての一般的説明は、最低限必要な動力の確認方法のみとする.

実用機構モデルを駆動するために必要な動力をWDで表すと、その計算式は次となる.

 $W_{\rm D} = \tau_{\rm D} \cdot \dot{\theta}_{\rm D} \tag{4.9}$ 

これへ式(3.14), (3.15)を代入すると、次式を得る.

$$W_{D} = \begin{bmatrix} \left\{ \overrightarrow{J_{1}T} \times \overrightarrow{F_{T}} + \overrightarrow{J_{1}m_{1}} \times m_{1}\overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_{1}m_{2}} \times m_{2}\overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_{1}m_{3}} \times m_{3}\overrightarrow{G} \right\} \\ + (F'_{s1,1} + F'_{s2,1})r_{1} - (k_{1,1} + k_{2,1})r_{1}^{2}\theta_{1}/2 \\ + u \begin{cases} \overrightarrow{J_{2}T} \times \overrightarrow{F_{T}} + \overrightarrow{J_{2}m_{2}} \times m_{2}\overrightarrow{G} + \overrightarrow{J_{2}m_{3}} \times m_{3}\overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,2} + F'_{s2,2})r_{2} - (k_{1,2} + k_{2,2})r_{2}^{2}u\theta_{1}/2 \end{cases} \\ + v \begin{cases} \overrightarrow{J_{3}T} \times \overrightarrow{F_{T}} + \overrightarrow{J_{3}m_{3}} \times m_{3}\overrightarrow{G} \\ + (F'_{s1,3} + F'_{s2,3})r_{3} - (k_{1,3} + k_{2,3})r_{3}^{2}v\theta_{1}/2 \end{cases} \end{bmatrix} \dot{\theta}_{1} \end{cases}$$

$$(4.10)$$

式(4.10)の値を得るためには第1関節の角速度 $\dot{\theta}_1$ の値が必要である.ここでは、先端の節の姿勢角 $\theta_1+\theta_2+\theta_3$ が0から $\pi$ まで等角速度で増加し、さらに再び0へ等角速度で戻るまでの行程を1秒間で済ませる運動を、最低限必要なものとする.そこで、それに相当する $\dot{\theta}_1$ の値として、次の値を与える.

$$\dot{\theta}_1 = 2\pi/(1+u+v) = 2\pi/3.5 \text{ [rad/s]}$$
(4.11)

機構の曲げ角度に対する必要動力 WD の変化を求めて Fig.4.2 に示す.本図から,おおよそ 2W 以上あれば良いことがわかる.次章で用いる実用機構では,4W クラスの Faulhabar 社製コアレス DC モータ[1724SR]を採用した.

また、ドラムを回転させるトルク $\tau$ Dの変化はWDの変化と同一なので、同図より $\tau$ Dが姿 勢角 $\theta_{1+}\theta_{2+}\theta_{3}$ の変化に対して大きく変化しないということも把握できる.これは、3.1節 で指摘したとおり、本機構の力制御が姿勢角を考慮せずに単純に行える可能性を示す.た だしこの長所を実現するためには、機構を極力軽く製作し、4.2節で説明したように必要最 小限の強さの圧縮バネを選択することが必要である.



Fig.4.2 Change of the drive power

#### 4.4 関節ユニットの連結方法

Fig.4.3 に外骨格機構の全体像とその運動状態を示す.本機構は指の上側の小さな空間(長 さ約 100mm,幅約 18mm)内に収められなくてはならない.さらに,指の3 関節の間隔は 指ごとに異なり,また人ごとに異なる.そこで,迂回ジョイントを任意の間隔で連結可能 なように,個々の関節機構を関節ユニットとしてまとめ,それらの間をねじで締結するた めの連結部分を関節ユニットの前後に設ける.二つの連結部分の重なり量を変化させるこ とで関節ユニット間の間隔を調整できる.また,関節ユニットを極力小形に設計しても長 さが大き過ぎて,一直線上に並べて連結すると,各迂回ジョイントの軸の間隔が人体の関 節の間隔を大きく超えてしまう.そこで,関節ユニットを薄い板状に構築し,外骨格機構 全体の中央線の左右に,一部が重なるように交互に配置する.そして,その中央線上に駆 動用ワイヤロープを通すことにする.Fig.4.4 に,関節ユニットの連結方法とロープの通し 方を示す.ワイヤロープを巻き取るドラムおよびそれを駆動するモータは,最も手の甲に 近い節の上に配置する.



Fig.4.3 A bending motion of the practical exoskeleton mechanism



Fig.4.4 Adjustable serial connection of three joint units

#### 4.5 スライダ機構の構造

2.5節で導入した反転歯車の中心軸を,扇形ピニオンの中心からラックに下ろした垂線上 に保持しなくてはならない.そこで,その中心軸を保持するためのスライダ機構を付与す る.Fig.4.5 に関節ユニットの分解図を示し,そのスライダ機構を説明する.スライダ上に 扇形ピニオンと反転歯車の回転軸を設け,両者を噛み合わせて搭載する.そのスライダは, 節に設けられた凹部と勘合し,節に対して自由な直線運動を行う.さらに,2.4節で導入し た圧縮バネの1種として,スライダと節の間をねじりバネで結合し,節の伸びる方向にス ライダを押す力を発生させる.

扇形ピニオンとスライダそれぞれが、節に対して円滑な直線運動をするための、直動案 内機構を説明する.Fig.4.6 にその機構を分解して詳細に示す.それぞれの直動案内機構を、 節に設けられた長穴状のスロットと、それに勘合する二つの小さな樹脂ローラにより構成 する.樹脂ローラの回転軸として、扇形ピニオンとスライダにピンを立てる.ここで、機 構の小型軽量化のために、次の工夫を加える.扇形ピニオン1とスライダ2は同じ運動を するから、ローラ軸のピンを長くして両者を貫通させることにより両者を一体化する.こ れによって、扇形ピニオン1とスライダ2のためのローラとスロットが共用となるため、 機構のさらなる小型軽量化が図れる.

29



Fig.4.5 Inner mechanism of the circuitous joint unit



Fig.4.6 Slide guide mechanisms

## 5 バイラテラル制御実験

本章では、外骨格機構の最も期待される応用先の一つとして、人型ロボットを遠隔操縦 するテレイグジスタンス・システムへの適用を想定し、本実用機構の有用性を確認する.す なわち、本実用機構をマスター、人型ロボットの指機構をスレーブとし、両者間のバイラ テラル制御の実験を行う.また、人間へ力の感覚を提示する方法として「遭遇型」を採用 する.緒言で述べたとおり、この方法は力を与える場合のみ機械と人間を接触させるもの であり、力覚提示方法として最も優れていると考えられる.

## 5.1 マスター機構

Fig.5.1 に製作したマスター機構を示す.マスター機構の設計では、その諸元がこれまで シミュレーションに用いてきた諸元(式(4.1)~(4.6))と極力同じになるように考慮した.長さ の次元は同一であり、質量もほぼ同一である.ただし、第1関節に内蔵する圧縮バネにつ いて、十分な強さを持ちかつ組み込み易いものの製作が困難だったので、その諸元はシミ ュレーションで用いた値の約半分となった.このことはワイヤが緩み易い問題を生ずるが、 人間の掌を下に向けた状態では動作に支障が無いので、実験はその状態で行った.





Fig.5.1 The master mechanism

## 5.2 スレーブフィンガ

人間と同等の機能を有するロボットハンドとして, Fig.5.2 に示す既に別途開発されている物を用いる. Fig.5.3 に示すとおり,これは人間の指の代わって本マスター機構と勘合することが出来るほどに,人間の指に近い次元を有する. 裏話を明かせば,マスター機構もスレーブ機構も設計時の参照先が筆者の右手であるから,合致することに不思議は無い.

スレーブフィンガの指先が物と接触する力を測定するために、薄いフィルム型圧力センサ(ニッタ社製 [FlexiForce])をスレーブフィンガの指先に貼り付けた.



Fig.5.2 The slave robot hand



Fig.5.3 Matching between the master and slave mechanisms

#### 5.3 バイラテラル制御方法

「遭遇型」の力覚提示機能を実現するためには、マスター機構が次の2種類の運動機能 を実現しなくてはならない.第1の機能は、人間の指先へ力の感覚を提示しない時に、人 間の指に当たらずにそれへ追従して運動することである.その際の制御方法の種類は位置 制御である.第2の機能は、人間の指先へ力の感覚を提示する時に、機構上の特定の部分(以 後、接触子と呼ぶ)を指先へ適切な力で押し当てることである.その際の制御方法の種類は 力制御である.

人間の指の運動を測定する機能は、上記の二つの機能によるマスター機構の運動結果を 人間の指の運動へ換算することで構築できる.すなわち、その機能は付随的に実現される ものである.そして、スレーブフィンガはマスター機構が測定した人間の指の運動へ追従 するように常に位置制御され続ける.

マスター機構における位置制御モードと力制御モードの切り替えは、スレーブフィンガの指先接触力の有無で行われる.スレーブフィンガの指先接触力が無い場合は位置制御モードとし、有る場合は力制御モードにする.これは極めて単純な単純なバンバン制御(bang-bang control)の一種である.

カ制御モードにおけるモータトルクの大きさは、マスター機構の接触子に貼られた圧力 センサの測定値とスレーブフィンガの指先に貼られた圧力センサの測定値との差に適切な ゲインを掛けて計算したものを用いる.4.3節で説明したとおり姿勢角の影響は軽微と考え、 その計算において姿勢角の影響を無視した.

#### 5.4 マスター機構のセンサ

マスター機構は1自由度なので、前節で述べた第1の機能のために必要な人間の指の運動情報も一つである. 爪は固くて指先に付いているので、指全体の運動を把握するための 測定点として利用しやすい. そこで、機構を運動制御するための情報として、人間の爪と、 機構の先端部との間の距離を用いる. 逆に言えば、その距離がある適切な値を維持するよ うに機構が運動することになる. 人間の爪へ力を与えないためにその距離を非接触的に測 定することが望ましいので、センサには光学距離センサ(三洋電機製 赤外線反射式の超小型 距離計 [SPI-315-34])を用いる. ただし、光学センサには爪の色や湾曲によって測定値にノ イズが入りやすいと考えられる. そこで、距離センサと爪の間に爪へスポンジバネで軽く 押し当てられて自由に動くステンレス製反射板を挿入する.

前節で述べた第 2 の機能を実現するために,スレーブフィンガの指先に貼り付けたもの と同じ圧力センサ (ニッタ社製 [FlexiForce])を,接触子上の人間の指先と接触する部分に 貼り付ける.

Fig.5.4 に以上の測定センサや接触子をまとめて搭載する部分(センサヘッドと呼ぶ)を示 す. なお,ここで用いたセンサは便宜的な例の一つであり,小型軽量の点で組み込みやす いが,測定精度やロバスト性がやや不足していると考える.組み込み易さを保ちつつより 性能の良いものが現れることが望ましい.



Fig.5.4 Sensor head on the finger tip

## 5.5 実験結果

実験の様子を Fig.5.5 に示す.本図が示すのはスレーブの指先が物に触っていない状態なので、マスター機構の接触子と人間の指先の間に 2mm の空隙(以後、Tip Gap と呼ぶ)が保たれるように、マスター機構が追従運動をしている.なお、本マスター機構は 1 自由度なので、人間は指の第 1~3 関節の連動をおおよそマスターのそれに合わせるように意識して動かさなくてはならない. 被験者の実感として、慣れれば違和感は無い.



Fig.5.5 Circumstance of an experiment

実験結果の一例として、マスター機構の姿勢角  $\theta_{1+}\theta_{2+}\theta_{3}$ 、人間の指先と接触子間の空隙 Tip Gap、人間の指先と接触子間の接触力、およびスレーブフィンガの指先接触力の経時変 化をFig.5.6 に示す.スレーブフィンガの運動は完全にマスター機構へ追従しているので、 ここには示さない.本図より、以下の性能が確認できる.

- 最初の約5秒の期間は人間が指を早く往復運動させており、マスター機構は Tip Gap を 2mm 近辺に維持するように追従している.
- 人体と機構の間に空隙があるので, Tip Gap が多少変動しても接触力が発生しない. すなわち,マスター機構の制御誤差や遅れの悪影響が緩和されている.
- スレーブフィンガの指先に接触力が生じている状態のマスター機構は、接触子を人間の指先に押し付けて、その接触力がスレーブフィンガの指先におけるものと同じになるように運動している.なお、スレーブフィンガの指先に与える接触力は、実験協力者に指先を押してもらって発生させた.
- 以上の位置制御モードと力制御モードの両方において、マスター機構は人間の指先の 運動に追従して運動することができるので、その測定装置として機能している.



Fig.5.6 Result of an experiment

マスター機構における位置制御モードと力制御モードの切り替えが単純なバンバン制御 であるため、接触子と人間の指先が衝突と分離を繰り返す発振現象を起こしやすい可能性 があった.ところが、実験ではそれが大きな問題とならなかった.その理由として、下記 のような機械的長所が有効に機能したと考えられる.

- 人間の指先と機構の接触子が分離している状態において、両者間の距離が極めて小さい、従って、衝突時の衝撃力が過剰に大きくなることがない。
- 人間の指先は適度な弾性と振動吸収性を有する.

以上より、本マスター機構は人間の指先へ自然な力覚を提示する機能と、人間の指の運動を測定する機能の両方を併せて実現可能であることが確認できた.本マスター機構はロボットの指を遠隔操縦するためのテレイグジスタンス・システムにおける外骨格機構として、高い有用性を持つと考える.

## 6 結言

本研究開発では、外骨格機構へ適用するのにふさわしい回転関節機構の新しい候補として、構造部材の存在しない空中にバーチャルな回転軸を有する迂回ジョイントを提案し、 その構造や特性を具体的に明らかにし、実験によりその有用性を確認した.

まず、その基本的な機能を実現するための原理的な機構について、実体的なモデルを用いて解説した.次に、人間の手指へ装着する外骨格機構を具体例として、その設計方法や実現可能な構造を詳細に説明した.最後に、その外骨格機構を製作し、人型ロボットの指機構との間のバイラテラル制御の実験を行った.そして、迂回ジョイントを用いた外骨格機構が、人型ロボットを遠隔操縦するテレイグジスタンス・システム用の操縦装置として高い有用性を持つことを確認した.今後は本機構を、Fig.6.1 に示すように親指を含む複数の手指に対応する外骨格型マスターハンドへ発展させる予定である.

さらに、本迂回ジョイントは、外骨格機構に限らず、バーチャルな回転軸を必要とする 関節部分へ一般的に応用できる.そして本論文は、その設計方法や駆動方法の検討におい ても、実用的かつ一般的な参考書となるであろう.



Fig.6.1 The exoskeleton master hand

## 7 あとがき (蛇足駄文)

ようやく,私が舘研究室にて研究開発した最も重要な対象である迂回ジョイントについて, その研究成果をまとめることができた. 着任(2001 年 4 月)から数えると,丸々5 年を要し たことになる. 特許申請や学会発表などのために部分ごとの文章や図は書き溜めてきたの であるが,本論文としてまとめるためにさらに 2 ヶ月強を要してしまった. いかんせん私 は遅筆すぎる.

本論文の1,2章の内容は着任からほぼ1ヶ月内に出揃っており,Fig.2.3やFig.2.6の作 成のための計算データは最初のゼミ(2001/5/30)のために用意したものがそのまま使われて いる.それなのに,その理論を文章として記述することを怠り,本論文の作成時にもう一 度考え直したので,大層無駄な時間を使ってしまった.特に悩んだのは,理想的なラック とピニオンの形状を計算するための式として Matlab 用計算プログラム中に次のものが残 されていたが,これがどのような理論展開で得られたのか記録と記憶が全く無いのである.

$$r(\theta) = \frac{p}{2 \cdot \cos^2(\theta / 2)} \tag{7.1}$$

確かにこれは式(2.2)と同じ意味であるが,私が普段行う図式的な思考方法では,式(7.1) を直接的に導く説明が思いつかない. 2.2節で記述したと同じ思考方法によってまず式(2.2) を導き,それを変形して式(7.1)を得た可能性もある.ただし,Matlab用計算プログラムを 作成するためにワザワザそのよう変形は不要なので,やはり別の思考過程を経てダイレク トに式(7.1)を得たと思われるのであるが・・・わからない.

もともと理論的な思考過程が無かった可能性も高い.私は,理論展開を直感でスキップ し、少しでも早く「モノつくり」に入ろうとする人間である.正直に言えば、第3章で展 開した数式も、機構が出来上がった後に作ったものである.私の直感に基づくと、以下の ような3段論法でそれらの理論展開はスキップ出来る.

 式(3.5)の説明で「圧縮バネの影響を除けば、ロープ張力と関節トルクが比例し、かつ関節角変位と無関係であることが分かる」と書き、さらに Fig.4.2 の説明で「本機構の力制御が姿勢角を考慮せずに単純に行える」と書いているが、以上のことは、 Fig.2.7 を見れば高校生レベルでも次式が脳裏に浮かぶから、本機構の制御の容易さやそのおおよその性能が直感的に把握できるハズ。

$$F_i = \tau_i / (2r_i + r_p) \tag{7.2}$$

 各種のシミュレーションをやって理論の説明や展開をやっているが、そこで用いた 機構諸元は具体的な設計がなされないかぎり目処が立たないものである.
 さらに、シミュレーション結果を吉とするには、機構の小型軽量化が最も有効であって、それは常識以外のナニモノでもない.

39

 以上より、Fig.2.7 に示した基本モデル+駆動方法の発想を獲得した後は、小型軽量 化を目指した機構設計こそが勝負の全てである! さらに加えるなら、部品加工業者へ製作精度の管理をキチンと指示し、出来上がっ た部品を調整と擦り合わせを重ねながら丁寧に組み立てることである。制御実験の アルゴリズムも、制御屋ではないから古典制御で十分。

とはいうものの,これでは論文がいつまで経っても書けませんね.マトモな科学者,研 究者にはなれません.はい,反省.

同様の例は他にもまだある.例えば Fig.6.1 の写真は私が任期を終える直前の 2003/3/6 に撮ったものである.本論文では記述を省いた親指根元機構も,いろいろ考えてこのよう に高度な機構として具体化した.ただし,説明図まではそろえているのであるが,なぜそ の構造にしたかという点の説明文は全く製作して来ていない.直感の結果を論理的に説明 することは,もともと難しい.さらに,その説明をある学生が待っているので,気が重い こと限りない.この蛇足駄文の章を書く代わりにその説明文を書けばよいのであろうが,任務と現実逃避との間の手の付けやすさの違いは大きい.だって,この章なら一日仕事♪

論文を書くのが破滅的に遅い私であるが、「モノつくり」に関してはこの5年間にあふれるほどやって来たと思う.本業の「モノつくり」をサボっていたのではない自負を示すために、ここに2001年以降の主な作品を列挙してしまおう.

Fig.7.1: ライフワークの一つになりそうなロボットハンド.発端は,琉球大学(現,筑波 大学) 星野聖先生の発注. 2001 年の第1世代は電装系が内蔵されていなかったが,2005 年 の第3世代は,電装系内蔵+全15自由+質量 500g 弱まで進化している.

Fig.7.2:そのロボットハンドを搭載して空気圧で動くロボットアーム.これも発端は星野聖先生の発注.実を言うと、上記ロボットハンドは本アームの付帯的存在だった.でも、どうせやるならと過剰な設計を進めた結果、現在のロボットハンドに至っている.

Fig.7.3:東大 舘研の全周型立体表示装置 TWISTER. 私が研究員の任期中に手がけた第3世代のものは, Siggraph2002 のためにアメリカまで持っていった. 設置と撤収にとても



Ver.1 (2001)





Ver.2 (2003) Fig.7.1 The humanoid universal hand

Ver.3 (2005)

(C) Ichiro KAWABUCHI, 2001-2006 (ichiro\_kawabuchi@kuramae.ne.jp)



Fig.7.2 The pneumatic humanoid arm



Ver.3 (2002)Ver.4 (2004)Ver.5 (2005)Fig.7.3TWISTER (Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope)



Fig.7.4 Master arm system





Fig.7.5 Robot skeleton for the RobotPHONE

苦労した. 任期後, さらに巨大化した第4世代を東大で, その改良版の第5世代を日本科 学未来館で製作した. これだけ大きなものは扱いがツライから逃げたいのだが・・・

Fig.7.4:これも私が研究員の任期中に手がけたものであるが, Fig.6.1 に示したマスター ハンドを懸架するマスターアーム.任期終了間際に急いで作った.極力小型軽量に作った がやはり大きいので,私は逃げたが,万博(2005)に出展したのは大変だったと思う.

Fig.7.5:さらにこれも私が研究員の任期中に手がけた,ヌイグルミに内蔵するロボット素体. Siggraph2001 へ出展後,イワヤが量産販売した RobotPHONE のプロトタイプである.

Fig.7.6:慶応大学 大西公平先生向けの 6 自由度パラレルマニピュレータ.大きくかつ機 械的に複雑な機構としては、私が今まで手がけた中で一番だと思う.



Fig.7.6 6D.O.F. parallel manipulator



Fig.7.8 Massage robot



Fig.7.7 Wheeled rescue robot



Fig.7.9 Batting robot

Fig.7.7:電気通信大学 松野文俊先生向けの車輪型レスキューロボット. 車輪の直径が 400mm とかなり大きく,大胆な軽量化のために大部分を 1mm 厚アルミ板で作った.

Fig.7.8:某大手電気メーカ向けの肩モミロボット.本当の指つかみ+力制御が出来る.制御システムを作り込む際に体験を繰り返したが、本格的に気持ち良かった.市販が待たれるが、そもそも市販できるのか?

Fig.7.9:広島大学 石井抱先生向けの超高速バッティングロボット. これも万博(2005)に 出したので、私はこちらの設置のためだけに会場へ行った.

実際に製作した装置だけで無く、VRの将来像を描いた図もいろいろある.

Fig.7.10:最初のゼミ(2001/5/30)のために用意した,テレイグジスタンスのマスターとスレーブ機構の構想図.任期が始まったばかりで、ノーテンキな気概があふれている.

Fig.7.11, Fig.7.12: テレイグジスタンスの将来像. いつか機会があれば・・・



Fig.7.10 Image of the master and slave system



Fig.7.11 Image of the future robot surgery



Fig.7.12 Image of the future virtual climbing

結局のところ、本研究開発に取り掛かれて本当に幸運であったと感じる.また、2001年 4月に舘先生からテレイグジスタンス・システム(通称 TELESAR)のどの部分を先ずやりた いですか?と訊かれて、即座にマスターハンドをやりたいと宣言した自分をとても正しか ったと思う.また蛇足ついでに本音を明かせば、下記のような強力な理由があったのだ.

- Fig.5.2 に示したロボットハンドを既に手がけており、それをそのまま TELESAR の スレーブに用いることが出来ると考えた. I am a businessman.
  - また、そのロボットハンドを自在に動かすコントローラがとても欲しかった.
- 外骨格機構は多くの機構屋の夢であるが、特にハンドの部分は難しくてほとんど実例 が存在しないから、挑戦し甲斐があると思った。
- マスターハンドの開発はお金と時間がとても掛かるハズなので、この機会を逃すと二度と得られないかもしれないと考えた。

私見ではあるが,結果としてそれなりのものが実現したので,ギリギリ任務は果たした?

それでは最後に,蛇足ではない記述を.

私を快く研究室に迎えて下さり、とても大きく貴重な機会を与えて下さった舘教授、お よびスタッフや学生のみなさま方へ、深く感謝いたしております.

本当にありがとうございました.

そしてまた、今後ともよろしくお願いします.

2006年2月10日 川渕一郎

