単一ワイヤ駆動ロボットハンドの Dynamic Preshaping

東 森 充* 金子 真*

Dynamic Preshaping for a Robot Hand Driven by a Single Wire

Mitsuru Higashimori* and Makoto Kaneko*

Dynamic preshaping is important for a high speed capturing robot to catch a moving object successfully. This paper discusses dynamic preshaping for a capturing robot driven by a single wire. To control the finger posture while approaching an object, there are three essential factors, wiring, spring distribution among joints, and mass distribution in each finger link. Giving the final link posture of finger, mass distribution, and tension with respect to time, we explore how to determine both the wiring and the spring distribution. We first show how to find them under a quasi-static motion, where all dynamic effects are neglected. We further explore an approach to find them under a dynamic motion where the tension increases fast enough.

Key Words: Preshaping, High Speed Capturing Robot, Catching, Wire Driven Robot, Wiring

1. は じ め に

ロボットが環境の変化に対して素早く応答するためには、センサ系、情報処理系、アクチュエータ系のすべての要素が俊敏に反応する必要がある。センサ系に関しては、1 [ms/frame] でトラッキング可能なビジョンシステム [1] が開発されており、情報処理系に関しては、近年の目覚ましいコンピュータ技術の進歩により高速処理が可能になってきている。これに対し、アクチュエータ系を含むロボット本体の応答性を向上させることを目的とし、筆者らは空中を移動する対象物を 50 [ms] で捕獲することができる 100G キャプチャリングロボット [2] を開発した。Fig. 1 に、このロボットが自然落下中のボールを捕獲している様子を示す。このロボットは、一般のビデオレートでいえば 2 フレーム以内 (60 [ms]) に捕獲動作を完了するため、実際に起こっている現象を肉眼および通常のカメラで確認することは到底できない。したがって、一見、グリッパがうまく対象物の把握位置へ移動しているように見受けられても、捕獲に失敗する場合、目視だけでその失敗原因を解明することができなかった。これに対し、1 [ms/frame] で撮影可能な高速カメラによる動作解析を通じて、グリッパが対象物に接触する際の指姿勢が必ずしも、捕獲に適しているわけではないことが分かってきた。対象物を捕獲するには、対象物に適した指形状を保ちつつ対象物にアプローチする方が、捕獲の成功率の向上につながることは容易に想像できる。本研究の目的は、このような Preshaping

Fig. 1 A series of pictures where the 100G capturing robot is capturing a ball

問題を高速捕獲動作にまで拡張することである。高速捕獲動作中のロボットハンドの指姿勢を考える場合、指リンク系の慣性力が無視できなくなる。したがって、高速捕獲動作の Preshaping 問題は、従来より提案されている物体を把握するための指姿勢を計画する問題に加え、慣性力を考慮したうえで指関節のトルクを調整する問題に帰着する。本研究では、初めに全指リンクが同時に対象物に接触する状態を捕獲する瞬間のロボットハンドの目標姿勢とした Dynamic Preshaping 問題を定義する。ここでは、超高速捕獲動作が実現可能な単一ワイヤ駆動方式のロ

原稿受付 2003 年 4 月 4 日

*広島大学大学院工学研究科

*Graduate School of Engineering, Hiroshima University

ロボットハンドが対象物を捕獲する場合の Preshaping 問題に限定する。単一ワイヤ駆動方式のロボットハンドに着目した理由は、超高速動作を実現するうえで必要不可欠な軽量化設計に適しているからである。このロボットは、単一のワイヤでハンドの開閉動作が実現でき、また、ハンドの初期姿勢を作り出すために各関節にバネが備わっている。本研究では、超高速ロボットハンドの具体例として、この単一ワイヤ駆動方式のロボットハンドに着目し、ロボットの機構的なパラメータの設計指針について考察する。ワイヤ張力を時間の関数として与え、目標姿勢を実現するような関節トルク配分を生成するためのハンドの機構パラメータ（プーリ配置位置・径、関節バネ定数）の最適設計問題について議論する。

2. 関 連 研 究

Preshaping とは、多指ロボットハンドが対象物に接近する仮定で対象物を把握しやすいようにハンドの形状を変化させる一連の動作のことをいう。Preshaping 問題を議論した研究は、これまでにいくつかある [4]~[12]。Bard and Troccaz [4] は、カメラ情報から対象物の形状を抽出し、対象物の形状にあわせてアプローチ相における多指ハンドの指姿勢を決める問題について論じている。また、Kang and Ikeuchi [5] は、カメラ情報を元に把握に適した対象物上の点を算出し、そこに指先をもっていくような指形状の計画問題を取り扱っている。Hong and Slotine [6] は、ランダムな位置からゆっくり投げられた球状物体を、リアルタイムで把握するアルゴリズムを提案し、その有効性を実験的に検証している。この場合、アームおよびハンドの捕獲直前の姿勢は、ビジョンから獲得された情報に基づき計画されている。Nakamura [7] らは、48 種類のセンサ情報と 29 種類のロボットの基本動作を融合させて多指ロボットハンドの指姿勢を決定する問題を取り扱っている。我々の知る限りにおいて、ダイナミクスを積極的に考慮した Preshaping 問題を取り扱った研究はない。

3. 問 題 設 定

3.1 単一ワイヤ駆動ロボットハンド

一般的なロボットでは、各関節にアクチュエータが組み込まれるため、ロボット全体の重量が増加し、結果としてロボットの動きが遅くなってしまう。これに対して、軽量化を計るために、アクチュエータをロボットのベースに配置してそこからワイヤを取り回して各関節を駆動するワイヤ駆動方式がよく用いられている [2] [3]。Fig. 2 に示すような、単一ワイヤにより全関節が制御される多関節ロボットハンドを考える。ここでは、アーム部の運動を無視し、ハンド部の開閉動作のみに着目する。このような単一ワイヤ駆動ロボットの全関節は 1 本のコントロールワイヤの張力により駆動される [2] ため、各関節への駆動トルクの配分は、プーリの配置位置、径等、ワイヤリング方式により支配され、1 入力（ワイヤ張力 T ）に対して、それぞれがカップリングした複数出力（関節駆動トルク τ ）を取り扱う問題となる。また、各関節には、ワイヤ張力がゼロの場合にリンクの初期姿勢を保持するためのバネが装着されているものとする。このバネは、関節トルクに対するブレーキとして機能する

Fig. 2 Model of a super high speed capturing robot driven by a single wire

Fig. 3 Various behaviors of object when finger links make contact with it

ことになり、指リンクが対象物へ接近する際の指姿勢を制御する働きを持つ。

3.2 目標姿勢

ロボットハンドが対象物を把握する場合、Fig. 3 (a), (c) のように、先端側あるいは根元側リンクが先に対象物と接触すると、ハンドは対象物を弾き飛ばしてしまう可能性が高く、捕獲しづらい。これに対して、Fig. 3 (b) のように、すべてのリンクが同時に対象物と接触すれば、ハンドは対象物を一気に拘束できる可能性が高くなる。以上の点を踏まえて、本研究では、Fig. 3 (b) のような把握形態を指リンクの目標姿勢とし、以下のように定義する。

目標姿勢：全指リンクが同時に対象物と接触する把握形態をハンドの目標姿勢とする。これは、目標姿勢の関節角度ベクトル $\theta_r \in \mathcal{R}^{\sum_{s=1}^U N_s \times 1}$ で表現する。ただし、 U はハンドの総指数、 N_s は第 s 指の総関節数 (= 総リンク数) とする。

3.3 Dynamic Preshaping 問題

本研究では、ロボットハンドによる物体捕獲動作を与えられ

目標姿勢 θ_r を実現するための問題としてとらえ、Dynamic Preshaping 問題を以下のように定義する。

Dynamic Preshaping 問題：ワイヤ張力 T を時間の関数として与え、目標姿勢 θ_r を以下の条件で実現するためのハンドの機構パラメータ（プーリ位置・径、関節バネ定数）を決定する。

$$\Delta t_{\theta_r} = \max |t_{\theta_{sir}} - t_{\theta_{sjr}}| < \varepsilon \quad (1)$$

$$(s = 1, \dots, U, i = 1, \dots, N_s, j = 1, \dots, N_s)$$

ただし、 $t_{\theta_{sir}}$ は第 s 指第 i 関節が目標角度に到達するときの時間、 $\varepsilon > 0$ は正の微小値とする。

なお、ハンド部の形状として目標リンク姿勢を実現することのみ着目し、接触前後の対象物の振る舞いに関しては議論しない。

4. 単一ワイヤ駆動ロボットの Dynamic Preshaping

4.1 ワイヤリング

本章では簡単のため、1本の指について示すものとし、指を表す添え字は省略する（例えば、 $N_s \rightarrow N$ ）。各指は平面内の運動のみを実現するものとし、Fig. 4のようにモデル化する。各リンクは回転軸が拘束されていないプーリを一つずつ持ち、ワイヤは根元プーリから各リンク上のプーリを経由して先端リンクに固定される。ここで、 $\mathbf{p}_i$, $\mathbf{p}_i^a$, $\mathbf{p}_N^{fix} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ は、それぞれ絶対座標系 Σ_0 から見た第 i 関節の位置ベクトル、第 i リンクに設置されたプーリ回転軸の位置ベクトル、第 N リンク（先端リンク）におけるワイヤ固定点の位置ベクトルとし、ハンド全体は、第 1 リンク関節 $\mathbf{p}_1$ で絶対系に固定されているものとする。 $\mathbf{p}_0^a$ は絶対系に配置されたプーリの回転軸位置ベクトルであり、通常、 $\mathbf{p}_0^a = \mathbf{p}_1$ として構わない。また、第 i プーリにおいて、先端向きワイヤに発生する張力ベクトルを $\mathbf{t}_i^f \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ 、根元向きワイヤに発生する張力ベクトルを $\mathbf{t}_i^b \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ とし、回転軸から各張力発生点を指すベクトルを $\mathbf{r}_i^f$, $\mathbf{r}_i^b \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ とする（ $\|\mathbf{r}_i^f\| = \|\mathbf{r}_i^b\| = R_i$ ）。摩擦がない理想的な状態を仮定し、ワイ

ヤ根に及ぼされる張力 T が、各プーリ周りに一様に発生する場合、 $\|\mathbf{t}_i^b\| = \|\mathbf{t}_i^f\| = T$ と同時に、以下の関係が成り立つ。

$$\mathbf{t}_i^f = -\mathbf{t}_{i+1}^b \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_i^b \otimes \mathbf{t}_i^b = -\mathbf{r}_i^f \otimes \mathbf{t}_i^f \quad (3)$$

ただし、 $\otimes$ は、任意のベクトル $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$, $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T$ に対して $x_1 y_2 - x_2 y_1$ を算出するスカラー演算子とする。第 i および第 $i+1$ プーリの張力発生点間を結ぶベクトルを $\mathbf{d}_i^{i+1}$ とすると、

$$\mathbf{p}_{i+1}^a = \mathbf{p}_i^a + \mathbf{r}_i^f + \mathbf{d}_i^{i+1} - \mathbf{r}_{i+1}^b \quad (4)$$

式 (4) の各項に対して $\otimes \mathbf{t}_{i+1}^b$ の演算を施し、 $\mathbf{d}_i^{i+1} \otimes \mathbf{t}_{i+1}^b = 0$ を考慮して整理することにより次式を得る。

$$(\mathbf{p}_{i+1}^a - \mathbf{p}_i^a) \otimes \mathbf{t}_{i+1}^b = (\mathbf{r}_i^f - \mathbf{r}_{i+1}^b) \otimes \mathbf{t}_{i+1}^b \quad (5)$$

第 i 関節周りに発生するトルク τ_i は、次式のようになる。

$$\tau_i = (\mathbf{p}_i^a - \mathbf{p}_i) \otimes \mathbf{t}_i^b + (\mathbf{p}_i^a - \mathbf{p}_{i+1}) \otimes \mathbf{t}_i^f \quad (6)$$

本式の導出に関する詳細は、付録 A を参照されたい。式 (6) を、式 (2), (3), (5) を用いて整理することにより、 τ_i は次式のように $\mathbf{r}_i^b$ を用いた形で表現することができる。

$$\tau_i = T R_i^{vp} \quad (7)$$

ただし、

$$R_i^{vp} = (\mathbf{p}_i^a - \mathbf{p}_i + \mathbf{r}_i^b) \otimes \mathbf{e}_i^b - (\mathbf{p}_{i+1}^a - \mathbf{p}_{i+1} + \mathbf{r}_{i+1}^b) \otimes \mathbf{e}_{i+1}^b \quad (8)$$

$\mathbf{e}_i^b (= \mathbf{t}_i^b / T) \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ は、リンク姿勢により決定される根元向き張力方向単位ベクトルである。式 (7) は、Fig. 5(a) の状態で発生しているトルクを、Fig. 5(b) のように、関節軸に設置された仮想的なプーリの半径 $|R_i^{vp}|$ と、張力 T の積として表現したものと考えることができる。ただし、 $|R_i^{vp}|$ は、リンク姿勢により変化する。

ここまでの議論より、全関節トルクと張力について以下の関係式が得られる。

$$\boldsymbol{\tau} = T [\mathbf{A} + \mathbf{B}] \mathbf{e}^b \quad (9)$$

ただし、

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_N]^T \in \mathcal{R}^{N \times 1} \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \otimes & -\mathbf{q}_2 \otimes & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{q}_{N-1} \otimes & -\mathbf{q}_N \otimes \\ 0 & & & & \mathbf{q}_N \otimes \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{N \times 2N} \quad (11)$$

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{p}_i^a - \mathbf{p}_i \in \mathcal{R}^{2 \times 1} \quad (12)$$

Fig. 4 A 2D finger model driven by a single wire

Fig. 5 Explanation of virtual pulley

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^b \otimes & -\mathbf{r}_2^b \otimes & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{r}_{N-1}^b \otimes & -\mathbf{r}_N^b \otimes \\ 0 & & & & \mathbf{r}_N^b \otimes \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{N \times 2N} \quad (13)$$

$$\mathbf{n} \otimes = [n_y, -n_x] \in \mathcal{R}^{1 \times 2}$$

$$\mathbf{e} = [\mathbf{e}_1^b, \dots, \mathbf{e}_N^b]^T \in \mathcal{R}^{2N \times 1} \quad (14)$$

$\mathbf{A}\mathbf{e}^b$ は、プーリ設置位置により決定されるトルク成分に対応し、姿勢により変化する。一方、 $\mathbf{B}\mathbf{e}^b$ は、プーリ径とワイヤ巻き方向に従い決定され、リンク姿勢に影響されないトルク成分である。したがって、Fig. 5 (c), (d) のように、 $\mathbf{q}_i = \mathbf{0}$ のモデルの場合、 $|R_i^{vp}|$ は常に一定となる。

4.2 準静的モデルによる姿勢解析

Fig. 6 のように、各関節にリンク間の相対角度により作用するバネ定数 k_i の回転バネが装着されているモデルを考える。ハンドの姿勢変化において、常に関節トルクとバネの復元力が釣り合った状態が連続的に起こっているとき、準静的モデルと呼ぶ。このとき、張力により生成される関節トルクとバネ定数の関係は、

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} \quad (15)$$

ただし、

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & -k_{N-1} & k_{N-1} + k_N & -k_N \\ 0 & & & & -k_N & k_N \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{N \times N} \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_N]^T \in \mathcal{R}^{N \times 1} \quad (17)$$

Fig. 6 Finger model with a single wire and springs

Fig. 7 Simulation model

ここで、準静的モデルにおいて、目標姿勢を実現するためバネ分配ベクトルの算出法について議論する。式 (15) は、次式のようにも表現できる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Q}\mathbf{k} \quad (18)$$

ただし、

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_1 - \theta_2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \theta_i - \theta_{i-1} & \theta_i - \theta_{i+1} \\ 0 & & & & \theta_N - \theta_{N-1} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{N \times N} \quad (19)$$

$$\mathbf{k} = [k_1, \dots, k_N]^T \in \mathcal{R}^{N \times 1} \quad (20)$$

ここで式 (18) のトルクは式 (9) のトルクにほかならないから、目標張力 T_r および目標角度 $\boldsymbol{\theta}_r$ におけるバネ分配ベクトル $\mathbf{k}$ は、次式で算出することができる。

$$\mathbf{k} = T_r \mathbf{Q}^{-1}(\boldsymbol{\theta}_r) [\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}_r) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}_r)] \mathbf{e}^b(\boldsymbol{\theta}_r) \quad (21)$$

上式は、目標姿勢を実現するためのバネ分配決定方法であり、準静的条件下における Preshaping 問題の一つの解法といえる。なお、 $|\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}_r)| = 0$ の場合、すなわち、少なくとも一つでも根元リンクとの相対角度がゼロのリンクが存在する場合は、目標姿勢を実現するバネ定数は算出できない。

【数値例 I】 Fig. 7 (a), (b) のような、絶対座標系 Σ_0 に $\mathbf{p}_0^a = \mathbf{p}_1$ で固定された 2 リンクハンド ($N = 2$) における

Fig. 8 Simulation results for confirming the effect of wiring

指リンク姿勢の変化について調べる。Fig. 7 (a) のように、 l_i を第 i リンク長として $l_1 = l_2 = 0.03$ [m], $R_0 = 0.02$ [m] とする。Fig. 7(b) において、 ${}^i\mathbf{p}_i^a \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ は、第 i リンクに固定された座標系 Σ_i から見たプリー位置ベクトルを示す。Fig. 8 は、張力 T に対する絶対系から見た関節角度 θ_i 、関節トルク τ_i の変化を示したものである。Fig. 8 (a) は ${}^1\mathbf{p}_1^a = \mathbf{p}_1$, $R_1 = R_2 = 0.02$ [m], $\mathbf{k} = [k_1, k_2]^T = [0.1, 0.1]^T$ [Nm/rad], Fig. 8 (b) は ${}^1\mathbf{p}_1^a = [0.03, 0.02]^T$ [m], ${}^2\mathbf{p}_2^a = [0.03, 0.02]^T$ [m], $R_1 = R_2 = 0.0$ [m], $\mathbf{k} = [k_1, k_2]^T = [0.1, 0.1]^T$ [Nm/rad], Fig. 8 (c) は ${}^1\mathbf{p}_1^a = [0.03, 0.0]^T$ [m], ${}^2\mathbf{p}_2^a = [0.03, -0.01]^T$ [m], $R_1 = R_2 = 0.0$ [m], $\mathbf{k} = [k_1, k_2]^T = [0.1, 0.1]^T$ [Nm/rad], Fig. 8 (d) は ${}^1\mathbf{p}_1^a = [0.03, 0.02]^T$ [m], ${}^2\mathbf{p}_2^a = [0.03, 0.02]^T$ [m], $R_1 = R_2 = 0.0$ [m], $\mathbf{k} = [k_1, k_2]^T = [0.5, 0.1]^T$ [Nm/rad] としたモデルである。姿勢計算は、次の手法で行った。式 (9), (15) から、釣り合い条件は次式で表現できる。

Fig. 9 A simulation result for confirming the catching condition

$$T[\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta})]e^{\mathbf{b}(\boldsymbol{\theta})} - \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0} \quad (22)$$

ここで、左辺を $\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}, T) \in \mathcal{R}^{N \times 1}$ と置く。 $\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}, T)$ を $\boldsymbol{\theta}$, T について微分することにより、次式を得る。

$$d\boldsymbol{\theta} = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{u}dT \quad (23)$$

ただし、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial \theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \mathbf{g}_N}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{g}_N}{\partial \theta_N} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{N \times N} \quad (24)$$

$$\mathbf{u} = \left[\frac{\partial \mathbf{g}_1}{\partial T}, \dots, \frac{\partial \mathbf{g}_N}{\partial T} \right]^T \in \mathcal{R}^{N \times 1} \quad (25)$$

式 (23) は、張力の微小変化量に対するリンク姿勢の微小変化量を表しているため、初期姿勢から張力を増加させていった場合のリンク姿勢変化を考察することができる。Fig. 8 (a) ではトルクは張力に対して線形的に変化するのに対して、Fig. 8 (b)～(d) では非線形的に変化する。Fig. 8 からリンク姿勢はワイヤリングとバネ定数に強く影響されることが確認できる。物体捕獲という観点から見れば、Fig. 8 (c) は、対象物を包み込むような Preshaping が実現できない。一方、Fig. 8 (b) は、指リンクが素早く対象物を包み込むため、適切な Preshaping が実現できる。

【数値例 II】 Fig. 9 (a) のような最終姿勢を実現するためのバネ分配ベクトルを求める問題を考える。ここで、 $l_1 = l_2 = 0.05$ [m], $R_0 = 0.01$ [m], $R_1 = 0.0$ [m], ${}^1\mathbf{p}_1^a = {}^2\mathbf{p}_2^a = [0.04, 0.007]^T$ [m] とする。目標張力 $T_r = 150.0$ [N], 目標角度 $\boldsymbol{\theta}_r = [\theta_{1r}, \theta_{2r}]^T = [0.96, 2.18]^T$ [rad] を与えた場合、式 (21) より、 $\mathbf{k} = [k_1, k_2]^T = [1.56, 1.48]^T$ [Nm/rad] を得る。Fig. 9 (b) は、このときの $\mathbf{k}$ を用いた、 T に対する θ_i の変化を表している。これによると、目標張力 $T_r = 150.0$ [N] において目標角度 $\boldsymbol{\theta}_r$ を実現していることが分かる。

4.3 Dynamic Preshaping

4.3.1 ダイナミクスの影響

前節までの議論では、ハンドのダイナミクスの影響は考慮されていない。本章では、ダイナミクスの影響を考慮したうえで目標姿勢を実現するための Dynamic Preshaping 問題について考察する。本モデルの運動方程式は、張力を時変として $T = T(t)$ とすると、次式で表すことができる。

Fig. 10 Link postures under ${}^1\mathbf{p}_1^a = {}^2\mathbf{p}_2^a = [0.04, 0.007]^T$ [m] and $T(t) = 0.1t$ [N]

Fig. 11 Link postures under ${}^1\mathbf{p}_1^a = {}^2\mathbf{p}_2^a = [0.04, 0.007]^T$ [m] and $T(t) = 4.0 \times 10^4 t$ [N]

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta}) = T(t)[\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta})]\mathbf{e}^b(\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} \quad (26)$$

ただし、 $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathcal{R}^{N \times N}$ は慣性行列、 $\mathbf{h}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta}) \in \mathcal{R}^{N \times 1}$ はコリオリ力、遠心力等を表す項である。

【数値例 III】 Fig. 10 および Fig. 11 に、【数値例 II】と同モデルのハンドにおけるダイナミックシミュレーションによる姿勢変化の様子を示す。各リンクの質量は 0.26 [kg] とし、バネ定数は $\mathbf{k} = [1.56, 1.48]^T$ [Nm/rad] としている。Fig. 10 および Fig. 11 では、張力をそれぞれ $T(t) = 0.1t$ [N]、 $T(t) = 4.0 \times 10^4 t$ [N] で増加させている。Fig. 10 より、張力の時間変化を十分小さくしたときには、物体捕獲に適した指姿勢が実現できていることが確認できる。これは、リンクの姿勢変化がダイナミクスの影響を無視できるほどにゆっくり起こっているためである。一方、Fig. 11 はダイナミクスの影響により、第 2 リンクが第 1 リンクに先行して対象物と接触している様子がうかがえる。この場合、各リンクを同時に対象物に接触させるためには、第 1 リンクのトルクを増加させ、第 2 リンクのトルクを減少させる必要がある。

4.3.2 目標姿勢実現のための機構パラメータ探索

式 (26) は非線形性が強く、目標リンク姿勢を実現するための Dynamic Preshaping 問題の解法をアルゴリズムに規定することは困難である。そこで、以降では機構パラメータを変動させることにより関節駆動トルクを調節し、式 (1) を満足する解を探索する方法をとることにする。関節駆動トルクの微調整を試みる場合、式 (9) より、張力 T により各関節のトルク分配比を変更することは不可能である。また、一般に、バネ定数、プーリ半径、質量分布による変更は物理的な面で微調整

Fig. 12 Finger mechanism with the capability of changing the pulley position

Fig. 13 Link postures under ${}^1\mathbf{p}_1^a = [0.04, 0.0027]^T$ [m], ${}^2\mathbf{p}_2^a = [0.04, 0.0077]^T$ [m] and $T(t) = 4.0 \times 10^4 t$ [N]

が困難である。これに対し、プーリ位置の変更は、Fig. 12 のようにアナログ的な微調整が容易に行える。以上の点を踏まえ、目標姿勢 $\boldsymbol{\theta}_r$ を実現するプーリ位置 ${}^i\mathbf{p}_i^a$ を探索する問題を、次の最適解探索問題に置き換える。

Minimize

$$Z = \Delta t_{\theta_r}$$

Subject to

$$\begin{aligned} {}^i\mathbf{p}_i^{\text{amin}} &\leq {}^i\mathbf{p}_i^a \leq {}^i\mathbf{p}_i^{\text{amax}} \quad (i = 1, \dots, N) \\ \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta}) &= T(t)[\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta})]\mathbf{e}^b(\boldsymbol{\theta}) - \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} \end{aligned}$$

ただし、 ${}^i\mathbf{p}_i^{\text{amin}}, {}^i\mathbf{p}_i^{\text{amax}} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ はそれぞれ第 i プーリ位置の可動制限を表す。ここで、目的関数 Z は、式 (1) の全リンク同時接触条件に対応する。

【数値例 IV】 前項 Fig. 11 のパラメータを例として、遺伝的アルゴリズムを用いてプーリ位置の解を探索した。Fig. 13 は、得られたプーリ位置 ${}^1\mathbf{p}_1^a = [0.04, 0.0027]^T$ [m]、 ${}^2\mathbf{p}_2^a = [0.04, 0.0077]^T$ [m] を使用した場合の姿勢変化を示す。なお、計算停止条件は、

$$\Delta t_{\theta_r} < \varepsilon \quad (\varepsilon = 10^{-3}) \quad (27)$$

で与えた。これは、最初にあるリンクが目標角度に到達してから 1.0 [ms] 以内に全リンクが目標角度に到達する状態を表す。なお、目標閉動作時間、張力関数、定数扱いとなる機構パラメータ値、プーリ位置の可動範囲によっては、様々な目標姿勢実現のための解を保証することはできないが、アプローチとしての妥当性は確認できる。

5. 結 論

本研究では、超高速ロボットハンドの一例として単一ワイヤ駆動ロボットハンドを取り上げ、ハンドが対象物を高速捕獲する問題に関して以下のことを示した。

- (1) 対象物を高速捕獲する際の Dynamic Preshaping 問題を、捕獲する瞬間の目標指姿勢を実現する問題として定義した。
- (2) 関節駆動トルクへ影響を及ぼす機構パラメータを整理し、張力と関節トルク配分の関係式を導出した。
- (3) 準静的条件下において、目標姿勢を実現するための関節バネ定数を算出した。
- (4) 動的条件下において、時間関数として与えたワイヤ張力の元で、目標姿勢を実現するためのパラメータ設計指針について示した。

本研究は、科学技術振興事業団「CREST (脳を創る)」の支援によって行われたものであることを付記しておく。

参考文献

- [1] A. Namiki, Y. Nakabo, I. Ishii and M. Ishikawa: "1-ms Sensory-Motor Fusion System," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.5, no.3, pp.244-252, 2000.
- [2] M. Kaneko, R. Takenaka, M. Higashimori A. Namiki and M. Ishikawa: "The 100G Capturing Robot—Too Fast to See—," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.8, no.1, pp.37-44, 2003.
- [3] S. Hirose and Y. Umetani: "Soft Gripper," Proc. of ISIR, pp.112-127, 1983.
- [4] C. Bard and J. Troccaz: "Automatic Preshaping for a Dexterous Hand from a Single Description of Objects," IEEE Proc. of Int. Workshop Intelligent Robots and Systems, pp.865-872, 1990.
- [5] S.B. Kang and K. Ikeuchi: "Toward Automatic Robot Instruction from Perception—Recognizing a Grasp from Observation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, pp.432-443, Aug, 1993.
- [6] W. Hong and J.E. Slotine: "Experiments in Hand-Eye Coordination Using Active Vision," Proc. of the 4th Int. Symp. of Experimental Robotics, pp.130-139, 1995.
- [7] Y. Nakamura, T. Yamazaki and N. Mizushima: "Motion Synthesis, Learning and Abstraction through Parameterized Smooth Map from Sensors to Behaviors," Proc. of the Int. Symp. of Robotics Research, pp.69-80, 1998.
- [8] T. Iberall, J. Jackson, L. Labbe and R. Zampano: "Knowledge-based Prehension: Capturing Human Dexterity," IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.82-87, 1988.
- [9] L. Deman, A. Konno and M. Uchiyama: "Flexible Manipulator Trajectory Learning Control with Input Preshaping Method," Proc. of the 38th SICE Annual Conf. Int., pp.967-972, 1999.
- [10] M. Kaneko, T. Shirai and T. Tsuji: "Scale-Dependent Grasp," IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics PART A: SYSTEMS AND HUMANS, vol.30, no.6, pp.806-816, Nov, 2000.

Fig. 14 Free body diagram for each link

- [11] M.R. Cutkosky: "On Grasp Choice, Grasp models, and the Design of Hands for Manufacturing," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.3 pp.269-279, 1989.
- [12] A. Namiki and M. Ishikawa: "Optimal Grasping Using Visual and Tactile Feedback," IEEE Proc. Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.584-596, 1996.

付録 A. ワイヤ固定点からの張力伝達と関節トルク

ワイヤ張力により各リンクの関節周りに発生するトルクについて考える (Fig. 14). 先端第 N リンクについて, $p_N^{fix} = p_N^a$, $r_N^f = r_N^b = t_N^f = 0$ と考えると, 固定点に発生する張力 t_N^b は, 第 N 関節周りに

$$\tau_N = (p_N^a - p_N) \otimes t_N^b \quad (A.1)$$

を発生させると同時に, 第 N 関節軸を介して, 第 $N-1$ リンクへ作用する. 第 $N-1$ 関節周りには, t_{N-1}^f , t_{N-1}^b , t_N^b によりトルクが発生するが, 式 (2) より, 第 $N-2$ リンクへは, t_{N-1}^b のみが作用する. 以下, 第 $N-2$ リンク・関節・プーリ以下も同様の関係が成り立ち, 一般的に第 i 関節周りに発生するトルクは,

$$\tau_i = (p_i^a - p_i) \otimes (t_i^f + t_i^b) + (p_{i+1} - p_i) \otimes t_{i+1}^b \quad (A.2)$$

上式を式 (2) を用いて整理することにより, 式 (6) を得る.

東森 充 (Mitsuru Higashimori)

1974 年 3 月 9 日生. 1998 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了. 同年株式会社東芝入社. 2002 年 8 月広島大学大学院工学研究科助手, 現在に至る. ロボットハンド, アクティブセンシングなどの研究に従事. 2003 年度計測自動制御学会技術奨励賞研究奨励賞を受賞. 計測自動制御学会の会員. (日本ロボット学会正会員)

金子 真 (Makoto Kaneko)

1954 年 1 月 18 日生. 1981 年東京大学工学系研究科博士課程卒業. 工学博士. 通産省工業技術院機械技術研究所, 九州工業大学助教授を経て, 1994 年より広島大学教授, アクティブセンシングや把握戦略の研究に興味を持つ. 日本ロボット学会論文賞 (1994), 計測自動制御学会論文賞 (1996, 2002), Humboldt Research Award (1997), IEEE ICRA The Best Manipulation Paper Award (2000), IEEE ISATP The Outstanding Paper Award (2001), 日本コンピュータ外科学会最優秀講演論文賞 (2004), IEEE RAS King-Sun Fu Memorial Best Transaction Paper Award (2004) 等を受賞. (日本ロボット学会正会員)