

バイオメカトロニクス研究室
2018 年度
年間研究活動報告書

作成日 2019 年 5 月 15 日

補助事業名

平成 30 年度粘弾性丸ベルト振り駆動機構と
柔軟指による物体操り制御手法 補助事業

JKA 補助事業により作成

論文一覧

【国内発表論文】

1. 清原健汰, 井上貴浩,
車輪型倒立振子の周期的時変ゲインを用いた走行旋回制御,
計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2018 年 12 月
2. 福本陽一, 井上貴浩,
柔軟な指先を持つ多関節ロボットによるなぞり動作に関する研究,
計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2018 年 12 月
3. 荒木佑介, 井上貴浩,
3 指ハンドによる柔軟対象物の柔らかい把持の実現,
日本機械学会年次大会, 2018 年 9 月
4. 貞光宏樹, 井上貴浩,
デュアルサンプリング周期が倒立振子安定化に及ぼす影響,
日本機械学会 中国四国支部 第 57 期総会・講演会, 2019 年 3 月
5. 福本陽一, 井上貴浩,
柔軟指を持つ 3 関節ロボットのなぞり動作による粗さ識別,
日本機械学会 中国四国支部 第 57 期総会・講演会, 2019 年 3 月

車輪型倒立振子の周期的時変ゲインを用いた走行旋回制御

○清原 健汰 (岡山県大院), 井上 貴浩 (岡山県大)

Driving and turning motion control of wheeled inverted pendulum using periodic time-varying gains

○Kenta KIYOHARA (Okayama Pref. Univ.), and Takahiro INOUE (Okayama Pref. Univ.)

Abstract : The purpose of this study is to control driving and turning motion of wheeled inverted pendulum by regulating the input voltage of dual motors. We show that a two-wheeled robot developed is able to run smoothly and turn around by means of periodic time-varying gains newly designed in this paper.

1. 緒言

手のひらの上で傘や棒を逆さに立てる遊びにおいて、手を適切に動かすことで傘や棒を立て続けることができる。倒立振子も同様に、適切な制御を行うことで倒立状態を維持することができる。新しい制御手法の検証や制御理論を学ぶための教材として用いられてきた。倒立振子にはさまざまな種類が存在し、車輪の回転により振子を倒立させる車輪型倒立振子もその一種である。これまでに、車輪型倒立振子を応用したパーソナルモビリティや移動ロボットが開発されており、場所を取らず小回りが利く特徴から、今後このようなロボットが増えると考えられる。

従来の最適レギュレータ理論を用いた車輪型倒立振子の制御は、倒立状態 ($\theta = 0$) を目的としており、 $\theta \approx 0$ 近傍で線形化することが多かった。そのため、姿勢がほとんど変わらない低速移動における走行制御では安定した走行が可能であった。しかしながら、傾いた姿勢を維持する高速移動における走行制御では安定した走行が困難であった。これに対して畠山らは、Zero Dynamics を利用し故意に不安定な前傾姿勢や後傾姿勢をとることで、倒立振子型移動ロボットの高速度移動制御を実現している [1]。また、山藤らは比例制御法による静止時における安定度の高いゲインから低いゲインを用いて、走行時の姿勢によってゲインを変えるゲイン変化法によりサーボ指令に対して所定の位置までの走行制御を実現している [2]。しかしながら、これらの制御系には複数の制御が行われており、従来の制御をより複雑なものとしている。また、車輪型倒立振子の移動制御の研究において車体の姿勢を制御するものが多く、速度と位置を同時に制御できる研究はあまりなされていない [3] [4]。

そこで本研究では、車輪型倒立振子においてモデルによる運動方程式とモータの動特性から、モータ電圧を入力とした状態方程式を導出し、最適レギュレータ理論を用いて積分型の最適サーボシステムを構成する。そして、そのシステムに目標値信号を与えることで、走行制御および旋回

制御を行う。また、周期的時変ゲインによる走行制御を行いその有効性を実験的に検証する。旋回制御においても車輪の角度を目標値信号とする旋回を行い、周期的時変ゲインを用いたときとの違いを明らかにする。

2. 車輪型倒立振子とモデリング

本研究で用いた車輪型倒立振子を Fig. 1 に示す。車体には、制御系としてのマイコン、駆動系としてのモータ、内界センサとしてジャイロセンサ、動力源としてバッテリーを有する自立型ロボットである。左右の車輪用モータはそれぞれ独立に駆動することができ、マイコンによる方向制御信号と PWM 信号により、モータドライバ回路を介して制御を行う。

2.1 状態方程式の導出

本研究では、1次元の計算モデルを用いて運動方程式を導出し、モータの動特性からモータ電圧を入力とした状態方程式を導出する。まず、運動方程式について説明する。運動方程式を導出するために用いた計算モデルを Fig. 2 に示す。各パラメータを Table. 1 に示す。ここで、左右の車輪を計算モデルに適應させるため、車輪の角度を左右の車

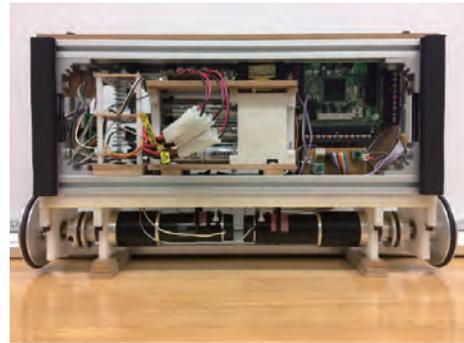


Fig. 1: Appearance of wheel inverted pendulum.

Table. 1: Parameters

Name of parameter	Symbol	Value	Unit
Mass of body part	M	7.0	[kg]
Mass of wheel part	m	0.59	[kg]
Center of gravity distance from axle	L	0.10	[m]
Radius of wheel	r	0.0435	[m]
Distance between wheels	b	0.455	[m]
Moment of inertia with respect to mass center of body part	I	8.9E-02	[kg · m ²]
Moment of inertia with respect to mass center of wheel part	J	4.7E-02	[kg · m ²]
Viscous friction coefficient of wheel	D_φ	1.0E-04	[kg · m ² /s]
Viscous friction coefficient of body	D_θ	1.5E-07	[kg · m ² /s]
Gravity	g	9.8	[m/s ²]
Viscous friction coefficient of motor	D_m	1.0E-04	[kg · m ² /s]
Motor moment of inertia	J_m	7.9E-06	[kg · m ²]
Armature resistance	R_a	0.58	[Ω]
Coefficient of the voltage induced	K_b	0.29	[V/(rad/s)]
Constant of torque	K_τ	0.29	[N · m/A]
Gear ratio	N	15	[-]

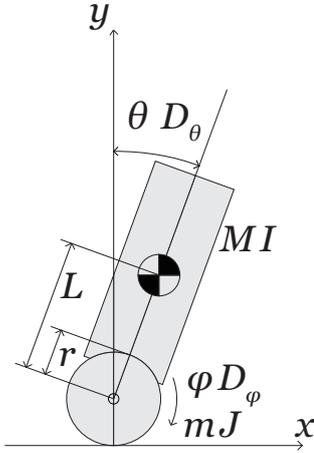


Fig. 2: Model of wheeled inverted pendulum.

輪の平均角度と仮定し、 $\varphi = (\varphi_l + \varphi_r)/2$ とすると、運動方程式 (1) 式が得られる。

$$\begin{cases} \frac{1}{4}a\ddot{\varphi}_l + \frac{1}{4}a\ddot{\varphi}_r + \frac{1}{2}(a+b)\ddot{\theta} \\ \quad + \frac{1}{4}D_\varphi\dot{\varphi}_l + \frac{1}{4}D_\varphi\dot{\varphi}_r = \tau_l, \\ \frac{1}{4}a\ddot{\varphi}_l + \frac{1}{4}a\ddot{\varphi}_r + \frac{1}{2}(a+b)\ddot{\theta} \\ \quad + \frac{1}{4}D_\varphi\dot{\varphi}_l + \frac{1}{4}D_\varphi\dot{\varphi}_r = \tau_r, \\ \frac{1}{2}(a+b)\ddot{\varphi}_l + \frac{1}{2}(a+b)\ddot{\varphi}_r \\ \quad + (a+2b+c)\ddot{\theta} + D_\theta\dot{\theta} - d\theta = 0. \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $\theta \approx 0$ 近傍で線形化しており、定数部分は以下である。

$$\begin{cases} a = J + (m + M)r^2, \\ b = MrL, \\ c = I + ML^2, \\ d = MgL. \end{cases} \quad (2)$$

次に、モータの動特性から車輪のトルク τ とモータ端子電圧 V_m の関係を考える。モータ電流を i_m 、モータインダクタンスを L_m 、逆起電力を e とすると電氣的応答は機械的

応答に比べて十分に速いので、 $L_m(di_m/dt) \simeq 0$ と近似でき、モータ端子電圧は

$$V_m = R_a i_m + e, \quad (3)$$

となる。モータの回転角度を φ_m とすると逆起電力はモータの回転角速度に比例するので、

$$e = K_b \dot{\varphi}_m, \quad (4)$$

となる。また、モータトルクを τ_m とすると、モータトルクは電機子の電流に比例するので

$$\tau_m = K_\tau i_m, \quad (5)$$

となり、(3)~(5) 式より

$$\tau_m = \frac{K_\tau (V - K_b \dot{\varphi}_m)}{R_a}, \quad (6)$$

と求まる。ここで、モータと車輪に関する角運動方程式は

$$J_m \ddot{\varphi}_m = \tau_m - D_m \dot{\varphi}_m - \frac{\tau}{N}, \quad (7)$$

であり、(6) 式を (7) 式に代入して、 τ について解くと

$$\tau = \left(-\frac{K_\tau K_b N}{R_a} - D_m N \right) \dot{\varphi}_m - J_m N \ddot{\varphi}_m + \frac{K_\tau N}{R_a} V, \quad (8)$$

の関係が得られる。よって、左右のモータの回転角度をそれぞれ φ_{ml} 、 φ_{mr} 、左右のモータにかかる電圧をそれぞれ V_l 、 V_r とすると、モータの回転角度と車輪の回転角度はギア比の関係より

$$\begin{cases} \varphi_{ml} = N\varphi_l, \\ \varphi_{mr} = N\varphi_r. \end{cases} \quad (9)$$

となり、左右のモータトルクと電圧の関係は

$$\begin{cases} \tau_l = \left(-\frac{K_\tau K_b N^2}{R_a} - D_m N^2 \right) \dot{\varphi}_l - J_m N^2 \ddot{\varphi}_l + \frac{K_\tau N}{R_a} V_l, \\ \tau_r = \left(-\frac{K_\tau K_b N^2}{R_a} - D_m N^2 \right) \dot{\varphi}_r - J_m N^2 \ddot{\varphi}_r + \frac{K_\tau N}{R_a} V_r. \end{cases} \quad (10)$$

となる。ここで状態変数を

$$x = \left(\theta \quad \dot{\theta} \quad \dot{\varphi}_l \quad \dot{\varphi}_r \quad \varphi_l \quad \varphi_r \right)^T, \quad (11)$$

とおくと、(1) 式、(10) 式からモータ電圧を入力とした状態方程式 (12) が得られる。

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (12)$$

ただし、

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 62.75 & 0 & 6.21 & 6.21 & 0 & 0 \\ -121.25 & 0 & -116.37 & 80.92 & 0 & 0 \\ -121.25 & 0 & 80.92 & -116.37 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -13.28 & -13.28 \\ 248.67 & -172.93 \\ -172.93 & 248.67 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$u = \begin{pmatrix} V_l & V_r \end{pmatrix}^T.$$

2.2 積分型最適サーボシステムの構成

得られた状態方程式をもとに、車輪の角度を目標値とする積分型最適サーボシステムを構成する [6]. 式 (12) より、出力 $y_p(t)$ は

$$y(t) = Cx(t). \quad (13)$$

ただし、

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

である。また、 (A, B) は可安定対、 (C, A) は可検出対、そして

$$\det \begin{pmatrix} A & B \\ C & O \end{pmatrix} \neq 0, \quad (15)$$

であるから、目標値 $y^{\text{ref}}(t)$ が定値 r になるような状態変数と入力の定常値 x_∞ , u_∞ は、式 (15) の条件をもとに一意に定まり、

$$\begin{pmatrix} x_\infty \\ u_\infty \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & O \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} O \\ I \end{pmatrix} r, \quad (16)$$

となる。ここで、 $\dot{w}(t) = e(t) := r - y$ の両辺を 0 から t まで時間積分すると、

$$w(t) = w_0 + \int_0^t e(t)dt, \quad (17)$$

である。ただし、 $w(0) = w_0$ である。 $w(t)$ の定常値を w_∞ とし、定常値 x_∞ , u_∞ , w_∞ からの変動を

$$\tilde{x}_e = \begin{pmatrix} \tilde{x}(t) \\ \tilde{w}(t) \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} x(t) \\ w(t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_\infty \\ w_\infty \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$\tilde{u}(t) := u(t) - u_\infty, \quad (19)$$

と定義すると、拡大偏差システム

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_e(t) = A_e \tilde{x}_e(t) + B_e \tilde{u}(t), \\ e(t) = C_e \tilde{x}_e(t). \end{cases} \quad (20)$$

$$A_e = \begin{pmatrix} A & O \\ -C & O \end{pmatrix}, B_e = \begin{pmatrix} B \\ O \end{pmatrix},$$

$$C_e = \begin{pmatrix} -C & O \end{pmatrix},$$

が得られる。つぎに、与えられた重み行列 $Q_{a1} = Q_{a1}^T > 0$, $Q_{a2} = Q_{a2}^T > 0$, $R_a = R_a^T > 0$ に対して定義される評価関数として各偏差の 2 次形式からなる

$$J = \int_0^\infty (\tilde{x}^T Q_{a1} \tilde{x} + \tilde{w}^T Q_{a2} \tilde{w} + \tilde{u}^T R_a \tilde{u}) dt, \quad (21)$$

を最小化するように、コントローラ

$$\tilde{u}(t) = K_e \tilde{x}_e(t), \quad K_e = \begin{pmatrix} K & G \end{pmatrix}, \quad (22)$$

を設計することを考える。このようなコントローラゲイン K_e は、最適レギュレータ理論により、リカッチ方程式

$$P_e A_e + A_e^T P_e - P_e B_e R_e^{-1} B_e^T P_e + Q_e = O, \quad (23)$$

の正定対称解

$$P_e = P_e^T = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{pmatrix} > 0, \quad (24)$$

を用いて、

$$\begin{aligned} K_e &= \begin{pmatrix} K & G \end{pmatrix} \\ &= -R_e^{-1} \begin{pmatrix} B^T & O \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -R_e^{-1} B^T P_{11} & -R_e^{-1} B^T P_{12} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (25)$$

のように唯一に定まる。よって、入力 u は次のように求まる。

$$u(t) = Kx(t) + G \int_0^t e(t)dt + F_a y^{\text{ref}}(t) + F_b x_0. \quad (26)$$

ただし、

$$y^{\text{ref}}(t) = r, \quad e(t) = y^{\text{ref}}(t) - y(t),$$

$$K = -R_e^{-1} B^T P_{11}, \quad G = -R_e^{-1} B^T P_{12},$$

$$F_a = (-K + 2GP_{22}^{-1}P_{12}^T I) \begin{pmatrix} A & B \\ C & O \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} O \\ I \end{pmatrix},$$

$$F_b = -2GP_{22}^{-1}P_{12}^T.$$

3. 周期的時変ゲインと制御手法

3.1 周期的時変ゲインによる走行の安定化

従来の最適レギュレータ理論を用いた車輪型倒立振子の制御は、倒立状態である $\theta = 0$ 近傍で可制御であることが知られており、制御の目的も倒立であったため、高速走行における傾いた姿勢の維持が困難であった [7]. そこで、静止時における安定性が高く、かつ走行時における傾いた姿勢を維持できるようなゲインについて考える。ゲインに

は安定度の高いものと低いものがあり、安定度の高いゲインは、車体があまり傾かず前後の揺れが小さいが、走行においてはその安定性が車体を傾ける妨げとなり、安定した走行ができない要因となる。一方、安定度の低いゲインは、車体がよく傾き前後の揺れが大きいが、走行においては傾いた姿勢を維持することができ安定した走行ができる。つまり、どちらか一方のゲインを用いるだけでは、静止時の安定性と走行時の安定性を両立させることができない。そこで、これらのゲインを短い時間で周期的に変化させることにより、静止時の安定性と走行時の安定性を両立させるゲインを設計する。

3.2 周期的時変ゲインの設計

状態変数 x にかかるゲイン K の中でも、特に、姿勢の安定性に影響する左右の車輪角速度ゲインに注目する。車輪角速度ゲインは増加させると車体の前後運動が小さくなり、減少させると車体の前後運動が大きくなる。本研究では、簡易的に周期的時変ゲインを設計するために、得られた左右の車輪角速度ゲインを制御周期である 2 ms の間隔で 1/5 ずつ増加させ、10 ms 周期で変化させる。そして、コントローラを設計するために評価関数の重み行列の各重みを設定し、動作を見ながら調整を行う。

3.3 目標値信号による走行および旋回

本研究で構成したサーボシステムに左右の車輪の目標角度をそれぞれ与えることで走行および旋回を行う。ここで、車輪型倒立振子の旋回運動において、厳密には 1 次元の車輪型倒立振子モデルとして扱うことができない。しかし、旋回時に本体の回転角速度が 60 deg/s 以下であれば、本体のバランスにほとんど影響がないことが実験的に確かめられている [5]。また、倒立状態を維持しながら移動する車輪型倒立振子において、急激な目標角度の変化は車体を不安定にし転倒の原因となる。そこで、目標値を徐々に変化させることで移動速度を調節し、かつ目標角度を設定することができるように目標値信号を生成し、車輪角度目標値に追従させるかたちで走行および旋回制御を行う。ただし、本研究で行う旋回は車体の中心を軸としてその場で旋回する Spin turn とする。次に、目標角度の設定について説明する。まず、車輪型倒立振子を 1 m 走行させる場合、Table. 1 の車輪の半径より、

$$\frac{1}{0.0435 \times 2 \times \pi} \times 360 = 1317, \quad (27)$$

となり、左右の車輪の目標角度を 1317 deg とすることで 1 m 走行を行うことができる。次に、90 deg 右に旋回させ

る場合、Table. 1 の車輪間距離より、

$$\frac{0.455 \times \pi}{0.0435 \times 2 \times \pi} \times \frac{1}{4} \times 360 = 470.7, \quad (28)$$

となり、左の車輪の目標角度を 470.7 deg、右の車輪の目標角度を -470.7 deg とすることで 90 deg 右に旋回を行うことができる。

4. 実験による検証結果

4.1 走行制御

本研究では、2 m の走行制御における通常の走行と周期的時変ゲインを用いた走行を行う。そこで、制御開始から 5 sec 後に左右の車輪の目標角度を 2 ms 毎に 1 deg の速さで増加させ、2 m の距離にあたる 2634 deg に達すると増加を止めるように目標値信号を入力し走行をさせる。通常の走行制御の応答を Fig. 3 に、周期的時変ゲインを用いたときの走行制御の応答を Fig. 4 に示す。

ここでは、ジャイロセンサの角速度を積分することで車体の角度を求めているため、積分によるドリフトが生じるが、ドリフトを処理せずとも安定した倒立と走行を実現することができている。通常の走行制御と比べて周期的時変ゲインを用いたときの走行制御は車体の揺れが明らかに小さく、安定した走行を実現できており有効性が確認できる。目標値信号では、遅れながら追従しているが、目標値には偏差なく到達していることがわかる。また、静止時の車体の揺れの大きさは周期的時変ゲインを用いた方が小さいことがわかる。

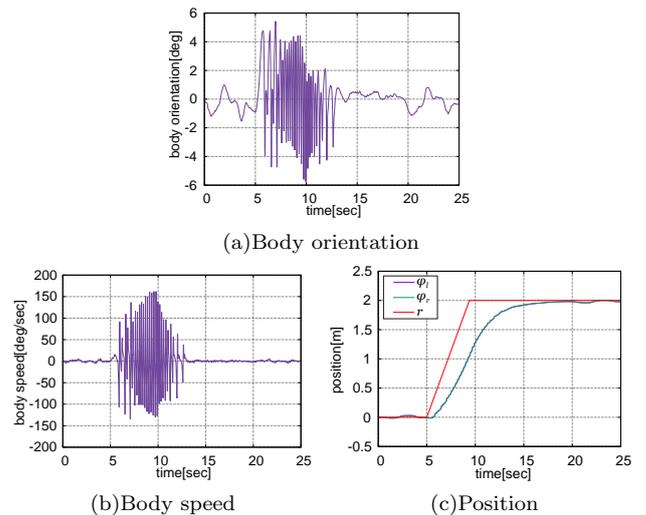
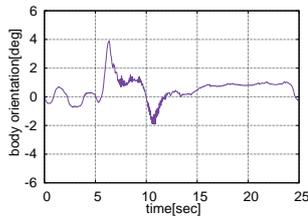
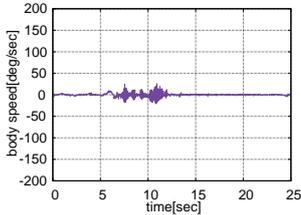


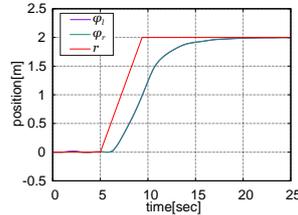
Fig. 3: Experimental results of the normal driving motion control.



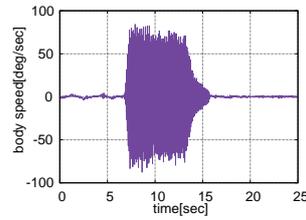
(a)Body orientation



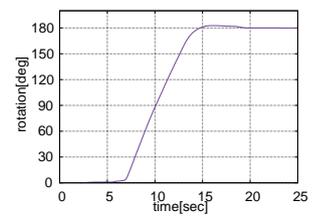
(b)Body speed



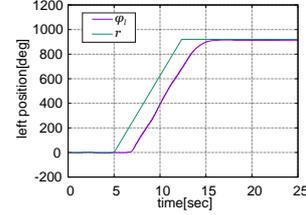
(c)Position



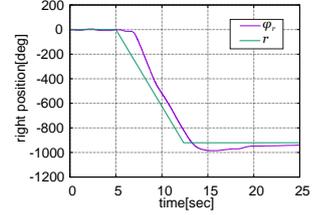
(a)Body speed



(b)Rotation



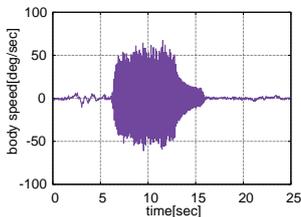
(c)Left wheel position



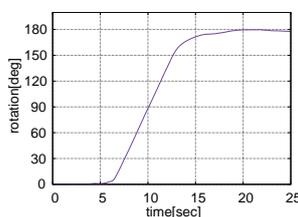
(d)Right wheel position

Fig. 4: Experimental results of the driving motion control using periodic time-varying gains.

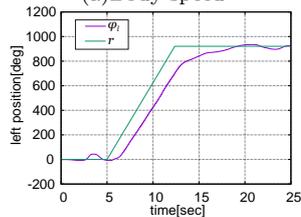
Fig. 6: Experimental results of the turning motion control using periodic time-varying gains.



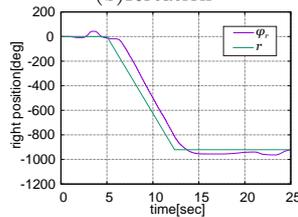
(a)Body speed



(b)Rotation



(c)Left wheel position



(c)Right wheel position

Fig. 5: Experimental results of the normal turning motion control.

を終えることができ、旋回制御においても有効であると考えられる。

5. 結言

本研究では、車輪型倒立振り子において左右のモータ電圧を入力とする状態方程式を導出し、車輪の角度を目標値とする積分型の最適サーボシステムを構成した。そして、移動速度と目標位置を設定する目標値信号の生成と周期的時変ゲインを用いた走行制御法により、高速移動時でも安定した走行ができることを実験的に検証しその有効性を確かめた。また、旋回制御においても同様に検証を行いその有効性を確かめた。

謝辞

本研究の一部は、JKA 補助事業 (27-146, 2018M-125) を受けて行われたものである。

4.2 旋回制御

次に、右回りで 180 deg の旋回制御における通常の旋回と周期的時変ゲインを用いた旋回を行う。そこで、制御開始から 5 sec 後に、左の車輪の目標角度を 10 ms 毎に 0.25 deg 増加させ、921 deg になれば増加を止めるように目標値信号を入力し、同じく、右の車輪の目標角度を 10 ms 毎に 0.25 deg 減少させ、-921 deg になれば減少を止めるように目標値信号を入力する。この時の通常の旋回制御の応答を Fig. 5, 周期的時変ゲインを用いた旋回制御の応答を Fig. 6 に示す。

車体の角度においては、積分によるドリフトの影響が見られたため省略する。車体の動きではともに振動的な挙動がみられるが、これは走行時のゲインを変えずに旋回制御を行ったためであり、ゲインを下げることで改善されると考えられる。旋回角度において、通常の旋回制御と比べて周期的時変ゲインを用いた旋回制御のほうがより早く旋回

参考文献

- [1] 島田明, 島山直也, “Zero Dynamics を利用した倒立振り子の高速移動制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.9, pp.1035-1041, 2006.
- [2] 山藤和男, 河村隆: “同軸二輪車の姿勢制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4, pp.338-343, 1988.
- [3] 尾崎, 大串, 下川, 林: “車輪型倒立振り子の位置・姿勢制御”, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.637, pp.3635-3642, 1999.
- [4] K. Pathak, J. Franch and S.K. Agrawal: “Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization”, *IEEE Transactions on robotics*, Vol.21, No.3, pp.505-513, 2005.
- [5] 河潤秀, 油田信一: “屋内環境を自律的にナビゲーションする平行二輪倒立振り子型自立移動ロボットの機能分散アーキテクチャによる実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.238-248, 1996.
- [6] 池田雅夫, 須田信英: “積分型最適サーボ系の構成”, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No1, pp40-45, 1987.
- [7] 島山直也, 島田明: “ロバスト性を考慮した倒立振り子型移動ロボットの高速移動制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.44, No.9, pp.721-728, 2008.

柔軟な指先を持つ多関節ロボットによるなぞり動作に関する研究

○福本 陽一（岡山県大院），井上 貴浩（岡山県大）

Fingertip-tracing Control using a Multi-joint Robot with Sensor-contained Soft-finger

○ Yoichi FUKUMOTO (Okayama Pref. Univ.), and Takahiro INOUE

Abstract : In this research, we developed a fingertip that can be attached to the tip of an articulated robot. This fingertip uses a flexible polyurethane resin with a built-in pressure sensor on the contact surface with the object. Furthermore, since the acceleration sensor is attached to the upper part of the fingertip, it is a compound sensation sensor which can detect pressure sensation and vibration sense which are mechanical stimuli. Texture detection is performed using this sensor, and it is shown that it is possible to quantitatively acquire the feature quantity. Finally, we verify the usefulness of this mechanism.

1. 緒言

人手不足を背景として家事代行・作業代行ロボットの活躍が期待されている [1]。人間の手の代わりにロボットハンドを用いて、物体の把持動作や操り動作を行うことになる [2]~[4]。そのためにはロボットが物体に関する物理情報を事前に取得する必要がある。その物体を特徴付けるものとして質量、形、大きさ、硬さ、そして表面形状が挙げられる。特に表面形状いわゆるテクスチャはツルツル、ザラザラ、凸凹といった情報のことを指し、その物体を把持し操るときに安定性に影響を与えられられる。つまりロボットハンドによる物体の滑らかな操り動作を実現するためには、その物体がどのようなテクスチャを有しているかを知ることが重要である。その際に視覚によって得られる情報だけではなく、実際に触ることで得られる情報も必要になると思われる。しかし従来のロボットハンドの場合は物体と接触する指が剛体でできている場合が多く、剛性が未知の物体を触ったときに物体を傷付けてしまう恐れがある。そのため物体と触れるロボットハンドの指先は人間の指のように柔軟な構造を有していることが望ましい [5][6]。そこで本研究では多関節ロボットの先端に装着が可能かつ、物体との接触面に柔軟な素材を用いた指先を開発する。ここでは物体との接触面に圧力センサを内蔵した超軟質造形用樹脂（以下、柔軟皮膚）を用いている。さらに指先上部に加速度センサを取り付けているため、機械的刺激である圧覚と振動覚を検出できる複合感覚センサとなっている。このセンサを用いてテクスチャ検出を行い、取得した特徴量を分布で識別することが可能であることを示し本機構の有用性を検証する。

2. 触覚検出センサとなぞり動作

2.1 センサシステム

人間は視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚という五感を通じ

て外界のあらゆる情報を感じ取る。中でも触覚は対象に触れることで発生する自身の器官の変形や温度変化を複合的な情報として受け取る。テクスチャを有する板に触れた場合、変形に伴う圧力情報や、表面形状に沿うことで発生する振動情報などを指先で取得し、物体の識別を行っていると考えられる。そこで今回開発した指先は加速度センサと力センサからなる複合感覚センサである。指先部の構造を Fig. 1 に示す。指の本体にはポリアセタール材（以下、POM）を用いており、アクリル板との接触面が水平となるようにする。その樹脂に、NITTA(株)の FlexiForce ボタンセンサが埋め込まれた柔軟皮膚を両面テープで貼付する。柔軟皮膚は人肌ゲルとも呼ばれ、人の肌の硬さに非常に近いものとなっている。FlexiForce の感圧部は円形で直径 10 mm の大きさである。柔軟皮膚の厚さはセンサを埋め込むことも考慮し 3 mm とする。埋め込まれた状態でキャリブレーションを行っている。そして指先上部に加速度センサを設置する。加速度センサは鉛直振動加速度と水平振動加速度の 2 軸の振動情報を取得可能である。

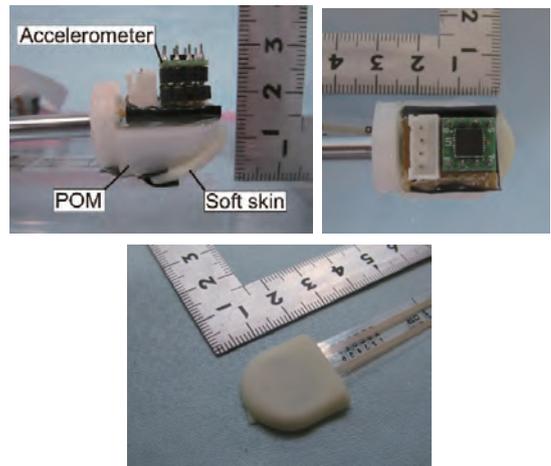


Fig. 1: The structure of the fingertip.

Table. 1: Relationship between searching action and tactile information (◎ is an extremely suitable motion, ○ is effective motion, ● is very suitable, and essential motion)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Lateral motion	◎	○	○				
Pressure	○	◎	○				
Static contact	○		◎		○	○	
Unsupported holding		○	○	◎	○	○	
Enclosure	○	○	○	○	◎	◎	
Contour following	○	○	○	○	○	○	●

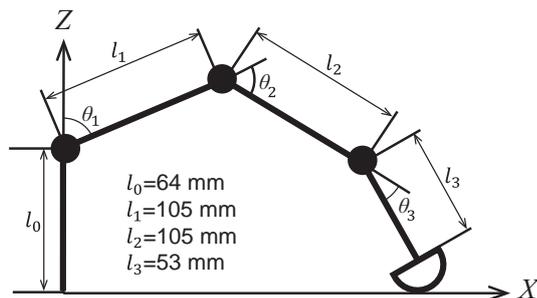


Fig. 2: Three-link robot model.

2.2 触覚情報となぞり動作

手指によって触覚触感の判断が行われるため、動作が重要である。この触運動知覚の研究はこれまで多くなされている。視覚を用いず手触り感や質感などのテクスチャ、硬さ、重さ、形状等の触覚情報をどのような動きによって得られるかなど、その探索行為について調査されている。Lederman ら [7] によって得られた各動作と触覚情報の関係を Table. 1 に示す。表中の数字は取得したい触覚情報を示しており、① テクスチャ、② 硬さ、③ 温度、④ 重さ、⑤ 体積、⑥ 全体の形、⑦ 細部の形状である。表中の◎は目的とする触覚情報の取得において非常に適した動作を、○は効果的な動作を、●は必須動作をそれぞれ表している。この表より取得したい情報によって必要な動作がそれぞれ異なることが分かる。人間が物体表面の形状を知るために行う動作として物体表面に沿うように指を動かすなぞり動作が挙げられる。なぞり動作は横方向の動きと圧迫を同時に行う動作でありテクスチャ検出に適していると考えられる。そのため今回の実験はなぞり動作を採用する。

2.3 3関節ロボットとなぞり制御

なぞり動作を行う3関節ロボットのリンクモデルを Fig. 2 に示す。可動域を広げるため人間の手指よりも各リンクが長くなるよう設計する。今回使用する3関節ロボ

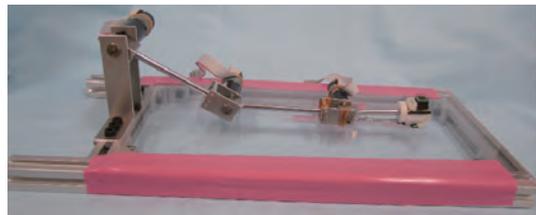


Fig. 3: Apparatus of three-link robot arm.

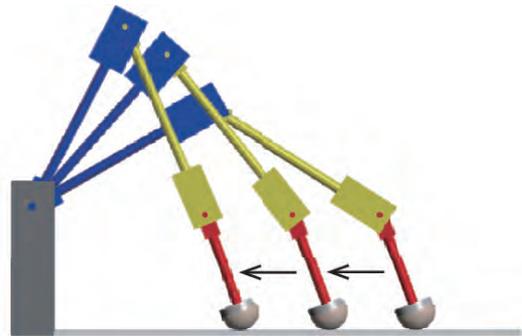


Fig. 4: Robot motion in simulation.

ットの概形を Fig. 3 に示す。可動関節数は人間の手指の関節数に等しい。各リンクの長さの比率は人間の手指を参考にしている。

加えて、一定の軌道を目指とした場合に取得される力や加速度のデータ分析をするために、機構の指先端がアクリル板に沿うように軌道追従制御する。そしてセンサの出力を一定にするには接触状態が変化しないことが望ましい。ロボット先端のリンク姿勢を維持しつつなぞり動作を行うため $\theta_{const.} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ の条件を満たす制御を行う。次に、動作の流れを以下に示す。

- (1) 3秒間でなぞり開始姿勢にする。
- (2) 2秒間静止し加速度センサの出力を安定させる。
- (3) 15秒間なぞり動作を行う。

Matlab/simulink でシミュレーションを行った。なぞり動作を行っている機構の様子を Fig. 4 に示す。

3. テクスチャ検出実験

3.1 実験条件

表面の凹凸や粗さの応答性を確認するため、凹凸のある表面をロボット指先でなぞらせたときの力の変化と加速度の変化を計測する。対象とする物体として POM で作成した 50 mm × 30 mm で、深さ 3 mm から 6 mm のテクスチャ板を用いる。人が感じる触覚は凸形状に依存すると考えられるため、本実験では凹凸の深さと表面形状に着目し Fig. 5 に示す三角柱型 (Group1) と半円柱型 (Group2) の2種類とする。本研究では Group1 は深さ 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm の4種類であり、Group2 は深さ 5 mm, 6 mm の2種類である。テクスチャ板の凹凸面がセンサの

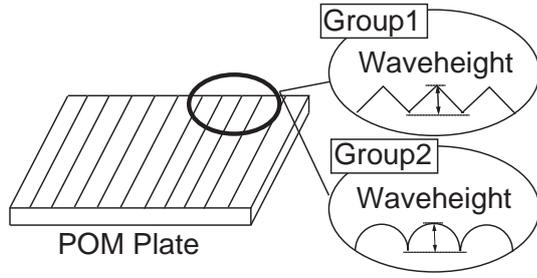


Fig. 5: Polyacetal texture board.

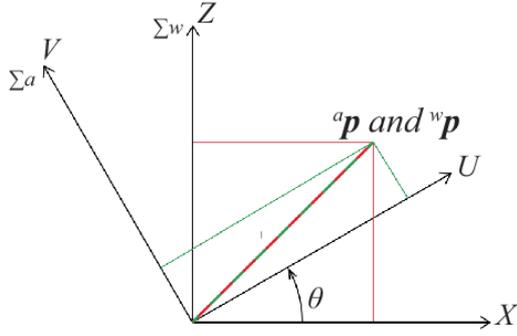


Fig. 6: Rotation matrix.

進行方向と平行となるように事前に決めた位置に固定する。一定の力で押下したまま表面上を速度 10 mm/s でなぞらせる。なぞり中の押しつけ力は 0.5 N, 1.0 N, 1.5 N の 3 種類である。応答の傾向を把握するため試行回数はテクスチャ板毎に各 5 回とする。

3.2 加速度センサの出力補正

なぞりを行っているとき加速度センサはある角度傾いている。そのため重力成分が 2 軸で計測される。センシングに影響することを考慮し、Fig. 6 のように回転の座標変換を行い出力を補正する。Eq. (1) のように計算することで、アクリル板に対して鉛直方向の振動の加速度を計測可能となる。ここで ${}^a\mathbf{p}$ は回転変換前のローカル座標の加速度ベクトルを表している。 ${}^w\mathbf{p}$ は回転変換後のワールド座標の加速度ベクトルを表している。

$${}^w\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} {}^a\mathbf{p} \quad (1)$$

3.3 信号処理

信号処理 [8] では、デジタル化されたセンサ出力のサンプリングデータ $x(i)$ を用いて振幅を評価するパラメータ Var を Eq. (2) のとおりに求める。 N は計算区域を示す i の値であり、 \bar{x} は計算区域の平均値である。また得られたセンサ出力に高速フーリエ変換による周波数解析を行い、高周波帯域の信号がどれだけ含まれているかを評価する

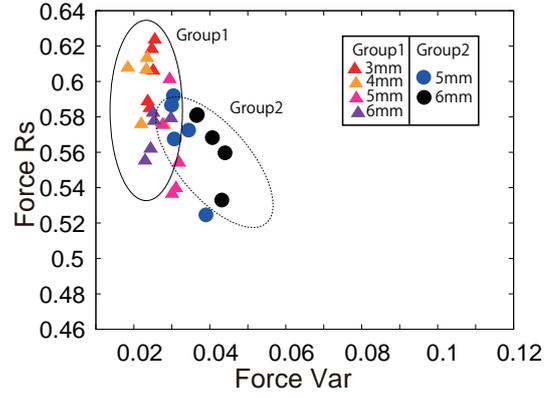


Fig. 7: Results of Var-Rs of the force measurement of 0.5 N.

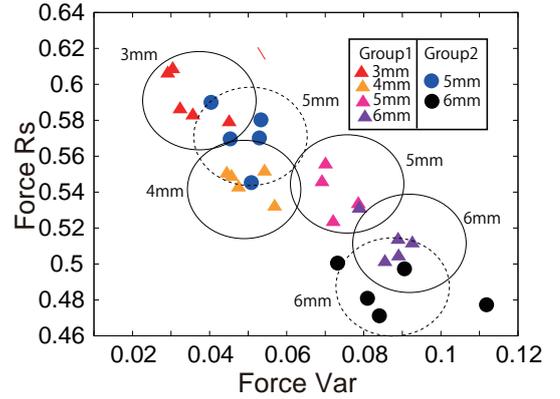


Fig. 8: Results of Var-Rs of the force measurement of 1.5 N.

Eq. (3) で表せる R_s を求める。式中 $p_i(f)$ は高速フーリエ変換で求められる i 番目の周波数 f でのパワースペクトル密度である。 $i = 411$ で 10 Hz に最も近い値になり、 $i = 2049$ で 50 Hz に最も近い値になる。

$$Var = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$R_s = \frac{S_a}{S_b}, S_a = \sum_{i=411}^{2049} p_i(f), S_b = \sum_{i=1}^{2049} p_i(f) \quad (3)$$

3.4 テクスチャ検出実験の結果

テクスチャ検出結果を Var-Rs 分布にて示す。Var-Rs 分布は横軸に Var をとり、縦軸に Rs をとる。Fig. 7 に押しつけ力 0.5 N のときの力センサ応答における Var-Rs 分布をプロットした結果を示す。Group1 の分布楕円を実線で表し、Group2 の分布楕円を点線で表す。分布楕円に重なりがあるものの、Group1 と Group2 の分布に偏りがみられる。これはテクスチャ板の Group 間の識別が可能であることを示唆している。Fig. 8 に押しつけ力 1.5 N のとき

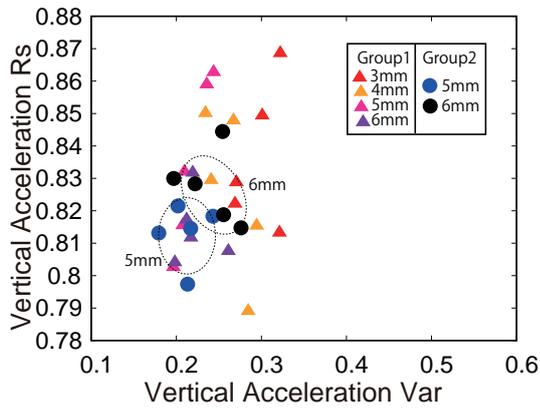


Fig. 9: Results of Var-Rs of the acceleration measurement of 0.5 N.

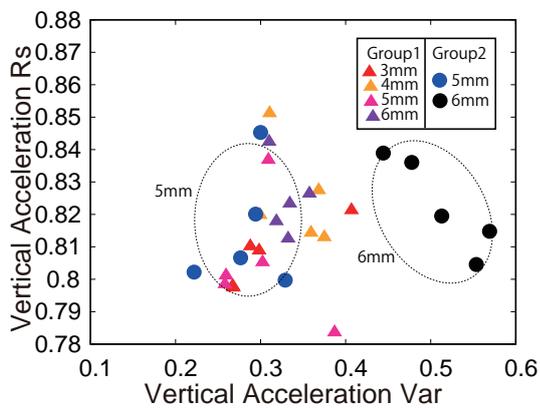


Fig. 10: Results of Var-Rs of the acceleration measurement of 1.5 N.

の力センサ応答における Var-Rs 分布をプロットした結果を示す。Group 内の分布の偏りをテクスチャ深さの違いで分けて分布楕円を作成する。Group1 の分布楕円を実線で表し、Group2 の分布楕円を点線で表す。Fig. 7 と比較すると、押しつけ力を増加させることにより Group 内での分布の違いが大きくなり、分布楕円の重なりが減少している。これは押しつけ力 0.5 N の場合には不可能であった両 Group 内での識別が可能であることを示唆している。Fig. 9 に押しつけ力 0.5 N のときの鉛直加速度センサ応答における Var-Rs 分布をプロットした結果を示す。Fig. 8 と同様に Group2 内のテクスチャ深さの違いで分けて分布楕円を作成する。分布楕円の重なりがあるものの Group2 のテクスチャ深さによる識別は可能であることが示唆される。しかし力応答と異なり Group 間での識別は分布が重なっているため難しいことが分かった。これはテクスチャ板と接触する面が柔軟構造をしていることに起因すると考えられる。柔軟な接触によりテクスチャ毎の固有の振動が抑えられている。Fig. 10 に押しつけ力 1.5 N のときの鉛直加速度センサ応答における Var-Rs 分布をプロットした

結果を示す。分布の作成方法は Fig. 7 と同様である。楕円分布の重なりがなくなり、Group2 における識別が可能であることが示唆される。Fig. 7 と Fig. 8 により、押しつけ力を何段階かに分けてなぞり動作を行った場合、Group 間もしくは Group 内にて Var-Rs 分布に偏りが出ることが明らかとなっている。先行研究 [8] とは用いているセンサ素子や開発した指構造が異なることや、柔軟な接触にて識別を行っている点など多くの点が異なる。しかし同様の信号処理アルゴリズムである Var-Rs 分布を用いて識別を行い、結果として分布に偏りが出るため、本機構がテクスチャの識別に有効であることが裏付けられる。また鉛直加速度においても Group2 内におけるテクスチャの識別が可能であることにより、開発した指先が複合感覚センサとしての識別性能を有することが示唆される。

4. 結言

本研究では、多関節ロボットの先端に装着が可能かつ、物体との接触面に柔軟な素材を用いた指先を開発した。柔軟皮膚に埋め込んだ圧力センサと、指先上部の加速度センサにより力感覚と振動感が計測可能である。開発した指先に粗さや質感に対するセンシング性能の検証を表面形状の異なるテクスチャ板を用いて行った。半円柱型と三角柱型という凸凹の形の識別や、凸凹の深さの識別を可能とする性能を有することが実験により明らかになった。以上の結果をもって、今回開発した複合感覚センサが触覚情報に対して識別性能を有し、取得した特徴量を分布で識別可能であることが示された。今後は人間とロボットによるテクスチャ識別の違いを考察するために被験者実験を行う。

謝 辞

本研究の一部は、JKA 補助事業 (27-146, 2018M-125) を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 中島正博, 小坂祥太, 松浦英雄, 福田敏男, “柔軟材料の変形を利用した圧電振動型触覚センサによるすべり検出”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.76, No.764, pp.930-935, 2010.
- [2] Joseph M.R. Katherine J.K. “Methods for Robotic Tool-Mediated Haptic Surface Recognition”, IEEE Haptics Symposium, pp.49-56, 2014.
- [3] H Hu, Y Han, A Song, S Chen, C Wang, Z Wang “A finger-shaped tactile sensor for fabric surfaces evaluation by 2-dimensional active sliding touch”, Sensors, vol.14, pp.4899-4913, 2014.
- [4] 村上剛司, 長谷川勉, “器用な多関節多指ロボットハンドのための柔軟被覆と爪を有する指先”, 日本ロボット学会誌, vol.22, No.5, 2004.
- [5] 多田泰徳, “内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指”, 日本ロボット学会誌, vol.23, No.4, pp.482-483, 2005.
- [6] 井上貴浩, 藤井郁夫, Dzung V. D., 杉山進, 平井慎一, Qiang W. “マイクロフォース・モーメントセンサ埋め込み型柔軟指先の製作と圧縮実験による評価”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.73, No.736, pp.3228-3233, 2007.
- [7] S.J.Lederman and R.L.Klatzky, “Hand Movements:A window into Haptic Object Recognition”, Cognitive Psychology 19, p.365, 1987.
- [8] 田中真美, “触覚・触感のメカニズムの解明とセンサシステムの開発に関する研究”, 精密工学会誌, pp.20-25, 2016.

3指ハンドによる柔軟対象物の柔らかい把持の実現 一力・圧力センサを有する半球突起の平行押し込みによるヤング率推定— Soft Grasping for Pliable Objects with 3-Fingered Robotic Hand

○荒木 佑介（岡山県大院），井上 貴浩（岡山県大）

Ysuke ARAKI and Takahiro INOUE, Okayama Pref. Univ., 111 Kuboki, Soja, Okayama, 719-117 Japan

In this paper, we propose the method of grasping “soft” objects with 3 fingered-Robotic hand. In order to realize this, we newly developed fingertip sized Young’s modulus sensor. Measuring pressure on robotic hand fingertip with the developed sensor and using expanded Hertz contact theory make it possible to estimate the Young’s modulus of various softness objects. Finally, we indicate about effectiveness of proposed method through the verification experiment.

Key Words: tactile sensing, Hertz contact theory, 3-fingered robotic hand, soft grasping

1 緒言

近年，コミュニケーションロボットが街中で散見されるようになった。今後はヒトの作業を代替するような実用的なロボットが普及し，ロボットがより包括的にヒトと関わる社会が期待される。このため，ヒトとロボットのフィジカルなインタラクションが増加することが予想されるが，そのような目的のロボットは未だ研究段階にある。ヒトの生活環境にはヒトそのものに加えて，食物や玩具などの柔軟物体が数多く存在し，ロボットはこれらを適切に取り扱うことが要求される。柔軟物体を扱うロボットハンドの研究はすでにいくつか行われており，Zhouらはロボットハンド自体を柔軟構造にすることで様々な形状・柔らかさの特性を有する物体に対して把持を実現するロボットハンドを開発した [1, 2]。しかし，これらのような把持物体の物性を考慮した力制御ができないハンドではその用途が狭く限定されることは明らかである。また，Teshigawaraら [3] や齋藤ら [4] のように滑り覚の検知によって把持力制御を行う研究も行われている。ヒトも滑り覚を認知して把持力を調節していると考えられるが，それは主に把持力の修正に使われており，初めの把持力決定のベースとなる情報とは言えない。加えて，物体の”柔らかさ”等の物性の認知がなければ把持力制御を行ったとしても，物体を破壊する可能性が高いと考えられる。

本稿では，物体の”柔らかさ”に着目し，Hertzの接触理論をベースとしたロボットハンドのためのヤング率推定システムを提案する。また，推定したヤング率をもとに3指ロボットハンドを用いた柔軟物体の柔らかい把持（ひずみ制御）を実現する。

2 ヤング率推定方法

2.1 ヤング率センサの概略

本稿で提案するヤング率センサの模式図を Fig.1 に示す。このセンサは POM(Polyoxymethylene) で形成し，薄い円柱に半球の突起を設けた形状に設計されている。寸法は直径 24.8[mm]，半球の半径 2.2[mm]，重さ約 1[g] である。また，半球突起と同じ面に 3 つの圧力センサと裏面に 1 つの力センサを配置した。提案システムでは，半球突起を対象物に押し付けることでヤング率推定を実現する。次節では，推定原理について述べる。

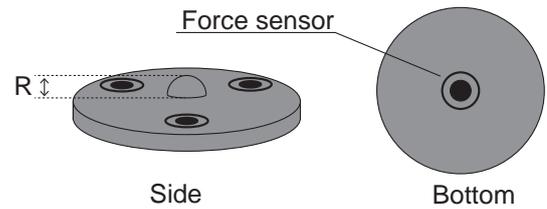


Fig.1 The schema of the developed Young’s modulus sensor.

2.2 ヤング率推定原理

医療・福祉分野での応用を目的として Hertz の接触理論を応用したヤング率推定方法がいくつか提案されている [5, 6]。これらの研究では，球圧子を用いたヤング率計測を行っているが，ヒト型ハンドの指先のような限られたスペースには球圧子は適していない。以下では，省スペースなヤング率センサの推定原理について述べる。

球と球の弾性接触では，Hertz の接触理論から接触面半径 a と押し込み量 d は次式で表される。

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi P(c_1 + c_2)}{8\alpha}}, \quad (1)$$

$$d = \sqrt[3]{\left\{\frac{3}{4}\pi P(c_1 + c_2)\right\}^2 2\alpha}. \quad (2)$$

ここで， c_1, c_2, α はそれぞれ

$$c_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{R_1 + R_2}{2R_1 R_2}, \quad (5)$$

である。また， P は押しつけ力， E_1, E_2 はヤング率， ν_1, ν_2 はポアソン比， R_1, R_2 は球の半径を表す。

以上の理論を Fig.2 のような球と平面の接触問題に適用するために， $R_2 \rightarrow \infty$ すると式 (5) は

$$\alpha = \frac{1}{2R_1}, \quad (6)$$

と変形できる。また，式 (1), (2), (5) を用いて， c_2 について解くと，

$$c_2 = \frac{4ad}{3\pi P} - c_1, \quad (7)$$

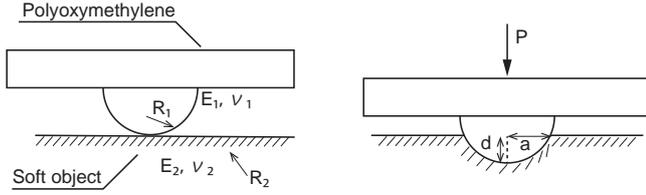


Fig.2 The schema of Hertz contact of the developed sensor and soft objects.

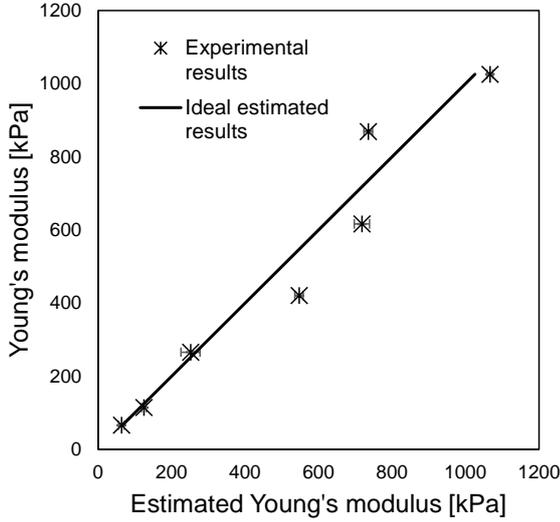


Fig.3 The experimental results of Young's modulus estimation.

を得る。ここで、対象物体が半球の半径に対して十分大きいと仮定すると、 $\nu_2 \approx 0$ となり式 (4) は次のように変形できる。

$$\tilde{E}_2 = \frac{1}{\pi c_2}. \quad (8)$$

さらに、式 (8) に式 (7) を代入すると次式を得る。

$$\tilde{E}_2 = \frac{3P}{4ad - 3\pi c_1 P}. \quad (9)$$

本研究では半球の材料に POM を用いるため、 $E_1 = 2.75 \times 10^9$ [Pa], $\nu_1 = 0.35$ となり、式 (3) より $c_1 = 0.10 \times 10^{-9}$ と算出できる。以上より、式 (9) を用いることで平面 (対象物体) のヤング率の推定が可能となる。

Fig.2 に示すように、平面に半球突起を設けることでセンサを物体に押し付けたときの押込み量を制限できる。これによって、式 (9) 中の接触面半径 a 、押込み量 d はセンサ上の半球の半径 R に等しくなる。また、センサ表面 (Fig.1 左図) の 3 つの圧力センサを用いて物体との接触判定を行う。各圧力センサが同時に圧力を感知したとき、物体と平行の状態接触したと判定し、センサ裏面 (Fig.1 右図) の力センサでこの時の押しつけ力 P を計測する。この時の計測値を推定式 (9) に代入することで、対象物体のヤング率を推定する。

3 検証実験

以下では、提案システムの検証実験を行う。開発したセンサを物体に垂直に接触させるためにここでは、圧縮試験機

を用いて実験を行う。実験対象はヤング率の異なる 7 個のポリウレタン樹脂とし、寸法は 56 [mm] \times 42 [mm] \times 16 [mm] である。

実験結果を Fig.3 に示す。多少の誤差はあるが、全体的に良好な推定結果であることがわかる。また、比較的ヤング率の低い 3 つの物体に対しては本来のヤング率とおおよそ一致する結果を得た。

4 柔軟物体のひずみ制御

本稿では柔らかい把持を柔軟物体のひずみ制御と定義する。これは、柔軟物体を潰さずに把持するためには、物体が潰れない程度の一定のひずみを与えつつ把持する必要があるためである。ここでは、前節のヤング率推定で比較的良好な推定結果を得た 2 つのポリウレタン樹脂 (それぞれヤング率 6.34×10^4 [Pa], 1.24×10^5 [Pa]) に対してロボットハンドを用いたひずみ制御を行う。

4.1 目標ひずみに対する指先力の決定方法

フックの法則 $\sigma = E\varepsilon$ から目標ひずみに対する指先力 F_d は次式で求められる。

$$F_d = E \frac{\delta L}{L} A, \quad (10)$$

$$\delta L = L\varepsilon. \quad (11)$$

ここで、 $L, \delta L, A$ はそれぞれ物体長さ、物体変形量、ロボットハンドの指先面積である。本実験では、 $L = 44.0$ [mm], $A = 78.5$ [mm²], $E = 6.34 \times 10^4$ [Pa], 1.24×10^5 [Pa] とし、3通りの目標ひずみ $\varepsilon = 0.1, 0.2, 0.3$ に対するひずみ制御を行う。また、制御則を以下に示す。

$$u(t) = -K_p e(t) - \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau - T_d \frac{d}{dt} e(t). \quad (12)$$

4.2 実験条件

本実験の様子を Fig.4 に、実験のシステム構成を Fig.5 に示す。3 指ロボットハンドの指先でポリウレタン樹脂をつまむようにしてひずみ制御を行う。ここで用いるロボットハンドはヒトの示指、中指、拇指を模したワイヤ駆動のフィンガで構成されている。また、示指、中指の指先には力センサを取り付け、この計測値をフィードバック量とし、拇指は物体が移動しないための支えとして用いる。5s 間隔で目標ひずみを $0.1 \rightarrow 0.2 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.2 \rightarrow 0.1$ と連続で変化させた時の変形量を計測し、出力ひずみを算出する。なお、本実験ではひずみをより正確に計測するために、ポリウレタン樹脂の両側に POM 板を取り付け、面を均等に圧縮できるようにしている。

4.3 実験結果

ヤング率 6.34×10^4 [Pa], 1.24×10^5 [Pa] の物体に対する実験結果をそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示す。Fig.6(a) は、ヤング率 6.34×10^4 [Pa] のポリウレタン樹脂に対する制御中の示指、中指に取り付けた力センサのそれぞれの時間応答である。目標ひずみの変化に応じて指先力が変化していることが確認できる。また、Fig.6(b) は同一のポリウレタン樹脂の目標ひずみと出力ひずみの差を示している。若干の偏差が残存しているが、概ね目標のひずみを実現できていることがわかる。

Fig.7(a), (b) はヤング率 1.24×10^5 [Pa] に対する同様の実験結果である。ヤング率 6.34×10^4 [Pa] のポリウレタン樹脂の場合と同様に目標ひずみを実現している。

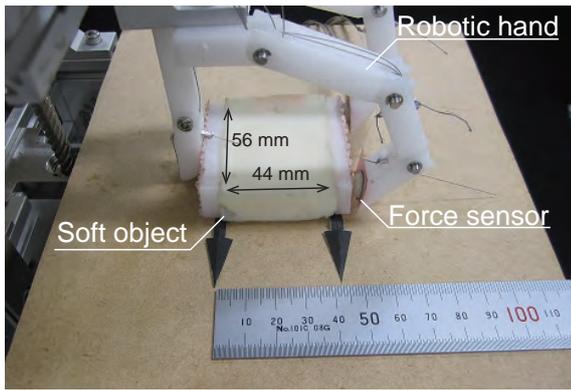


Fig.4 The experiment conditions.

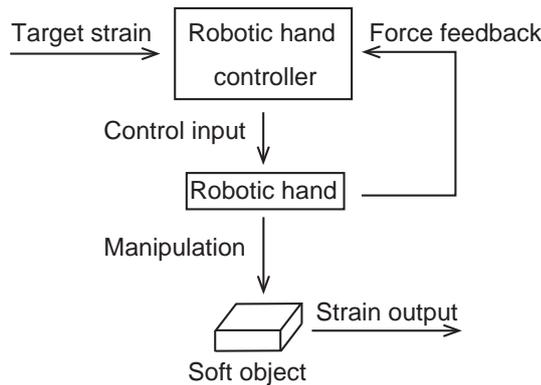


Fig.5 Strain control system.

5 結言

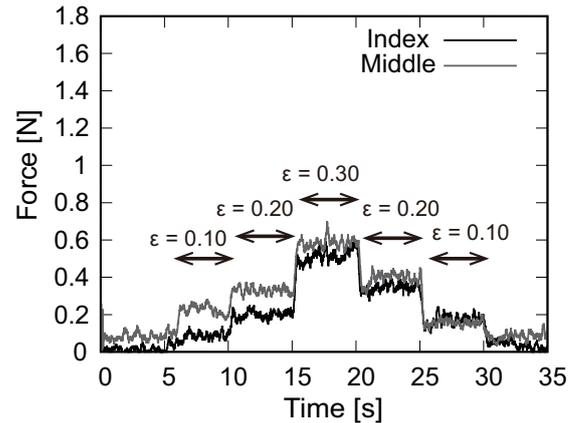
本稿では、初めに Hertz の接触理論をベースとしたヤング率推定システムを提案した。半球突起を有する土台に 3 つの圧力センサと 1 つの力センサを取り付け、展開した Hertz の接触理論を用いることで柔軟物体のヤング率推定システムを構築した。検証実験では、ヤング率の異なるポリウレタン樹脂に対して良好な推定精度を示した。最後に、3 指ロボットハンドを用いたポリウレタン樹脂のひずみ制御を行い、3 通りにひずみを連続で推移させる制御を実現した。

謝 辞

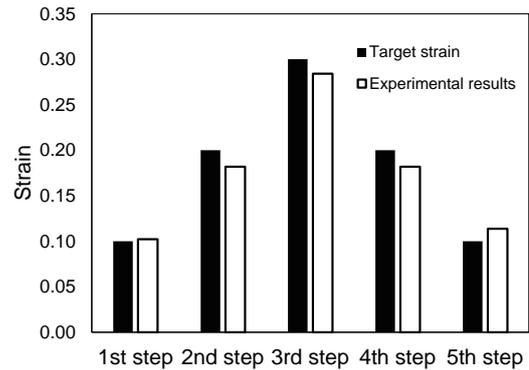
本研究の一部は、科研費基盤研究 A(15H02230), JKA 補助事業(2017M-112;2018M-125) を受けて行われたものである。

文献

- [1] Jianshu Zhou et al. , "A Soft-Robotic Gripper With Enhanced Object Adaptation and Grasping Reliability", IEEE Robot. Autom. Lett. Vol.2, No.4, pp.2287-2293, 2017.
- [2] Jianshu Zhou et al. , "BCL-13: A 13-DOF Soft Robotic Hand for Dexterous Grasping and In-Hand Manipulation", IEEE Robot. Autom. Lett. Vol.3, No.4, pp.3379-3386, 2018.
- [3] Seiichi Teshigawara et al. , "High Sensitivity Initial Slip Sensor for Dexterous Grasp", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010.
- [4] 齋藤直樹 ら, "柔軟センサによる並進/回転方向滑りを考慮した把持力の調整", 電気学会論文誌, Vol.126, No.8, pp.990-996, 2006.
- [5] 谷充博ら, "球圧子の押し込み試験による軟材料の厚さと Young 率の計測", 日本機械学会論文集, Vol.75, No.755, pp.125-132, 2009.
- [6] 土井一浩ら, "押し込み試験による皮膚組織のヤング率推定における Hertz 接触理論の展開", 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833, pp.15-26, 2016.

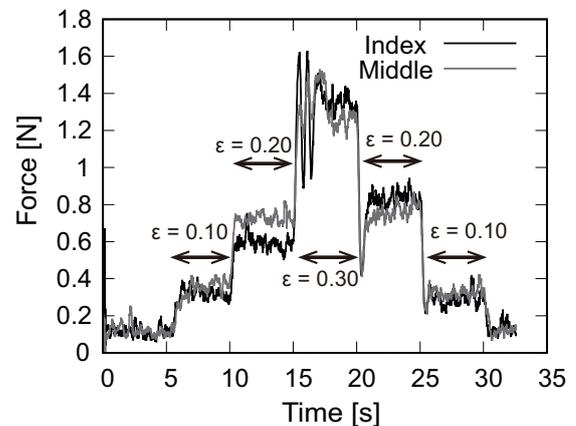


(a) Fingertip force output while strain control.

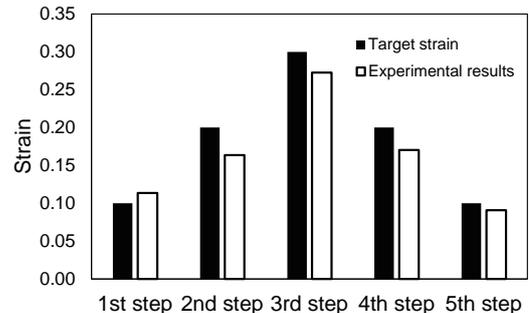


(b) The deviation of strain output.

Fig.6 The experimental results of strain control to $E = 6.34 \times 10^4$ [Pa].



(a) Fingertip force output while strain control.



(b) The deviation of strain output.

Fig.7 The experimental results of strain control to $E = 1.24 \times 10^3$ [Pa].

デュアルサンプリング周期が倒立振り子安定化に及ぼす影響

Effect of Dual Sampling Periods on Stabilization of Inverted Pendulum

○学 貞光 宏樹 (岡山県大院), 正 井上 貴浩 (岡山県大)

Hiroki SADAMITSU, Takahiro INOUE, Okayama Pref. Univ.

Key Words: inverted pendulum, stabilization, optimal control, dual sampling periods.

1 緒言

倒立振り子はアクチュエータの数が動作関節の数よりも少ない劣駆動システムである。倒立振り子は単純な構造かつ古典制御理論や現代制御理論など制御工学について学習できる点から多くの大学・高専における多くの実験で利用されている。しかし、教育現場で利用されるマイコンのデータ数やセンサ性能に制限が存在する可能性がある。マルチレートサンプル値系では入力サンプル点間で出力を余分に検出したり、逆に入力値の更新回数を増やすことで、見かけ上、出力数または入力数を増やすことができるため、出力が増えた時不変システムとしてとみなせ、離散時間系としての特性改善を行えることが知られている⁽¹⁾。美名らは入力の切り替え周期に対して出力を多くサンプリングし、サンプル点間の出力情報を用いることにより、強安定化が可能であることを述べている⁽²⁾。

本研究では回転型倒立振り子の振り上げ動作から始まる倒立安定化制御を異なるサンプリング周期で行う。具体的には bang-bang 制御で振り上げ制御、最適レギュレータに利用したフィードバック制御で安定化制御を行う。第2リンクのサンプリング周期を基準として、意図的に第1リンクのサンプリング周期を遅らせることが回転型倒立振り子の振り上げ安定化制御にどのような影響を与えるかを検証する。

2 回転型倒立振り子とモデリング

回転型倒立振り子のモデルを Fig.1 に示し、回転型倒立振り子の各パラメータを Table 1 に示す。本実験で使用した回転型倒立振り子の状態方程式は次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} u. \quad (1)$$

ただし、変数部分は以下のとおりとする。

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{32} = \frac{bd}{(a-s)c-b^2}, \quad a_{33} = \frac{c(-C_\alpha+t)}{(a-s)c-b^2} \\ a_{34} = -\frac{bC_\beta}{(a-s)c-b^2}, \quad a_{42} = -\frac{(a-s)d}{(a-s)c-b^2} \\ a_{43} = -\frac{b(-C_\alpha+t)}{(a-s)c-b^2}, \quad a_{44} = -\frac{(a-s)C_\beta}{(a-s)c-b^2}, \\ b_3 = \frac{cp}{(a-s)c-b^2}, \quad b_4 = -\frac{bp}{(a-s)c-b^2}, \\ a = I_\alpha + m_\beta l_\alpha^2, \quad b = -m_\beta l_\alpha l_\beta, \\ c = I_\beta + m_\beta l_\beta^2, \quad d = -m_\beta g l_\beta \varphi, \\ s = -J_m N^2, \quad t = -D_m - \frac{K_\tau K_b}{R_a}, \quad p = \frac{K_\tau N}{R_a}. \end{array} \right.$$

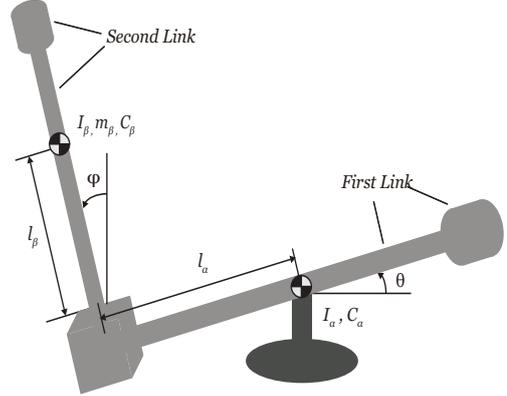


Fig.1 Model of rotational inverted pendulum system.

Table 1 Parameter values

Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass of first link	m_α	159.2×10^{-3}	[kg]
Distance from first link to second link	l_α	0.2	[m]
Moment of inertia of first link	I_α	6.9×10^{-3}	[kg · m ²]
Viscous friction coefficient of first link	C_α	1.0×10^{-3}	[kg · m ² /s]
Mass of second link	m_β	65.3×10^{-3}	[kg]
Length of second link	l_β	0.222	[m]
Moment of inertia of second link	I_β	4.0×10^{-3}	[kg · m ²]
Viscous friction coefficient of second link	C_β	1.3×10^{-3}	[kg · m ² /s]
Gravity	g	9.8	[m/s ²]
Viscous friction coefficient of motor	D_m	1.0×10^{-3}	[kg · m ² /s]
Motor moment of inertia	J_m	4.16×10^{-7}	[kg · m ²]
Armature resistance	R_a	33.3	[Ω]
Coefficient of the voltage induced	K_b	26.2×10^{-3}	[V/(rad/s)]
Constant of torque	K_τ	26.2×10^{-3}	[N · m/A]
Gear ratio	N	24	[-]

3 倒立安定化制御

回転型倒立振り子が倒立状態を維持しているとき、安定化制御が行えているといえる。すなわち、安定化制御において第2リンクを制御することが最も重要である。一方で回転型倒立振り子においては第1リンクを分離し個別で考えると、第1リンクは安定であると示唆されている⁽³⁾。そのため、第2リンクに比べ、第1リンクはサンプリング周期を遅らせても振り上げ安定化制御は可能であると考えられる。そこで、本実験では第1リンク、第2リンクのサンプリング周期 T_{s1} , T_{s2} が一致したときと T_{s1} を遅らせたときの倒立安定化への影響を検証する。

3.1 振り上げ制御

第2リンク角度が 165 deg に達するまでの振り上げ制御を ON-OFF 制御と呼ばれる bang-bang 制御で行う。bang-bang 制御のモータ入力が入力電圧 = 99.9% であり、入力

時間 t は以下のとおりである.

$$t = \begin{cases} 0 \sim 0.4 \text{ s}, \\ 0.45 \sim 0.95 \text{ s}, \\ 1.0 \sim 1.1 \text{ s}. \end{cases}$$

3.2 安定化制御

165 deg 以降の安定化制御を最適レギュレータを利用したフィードバック制御で行う. 最適レギュレータとは次式の評価関数を最小化する入力を見つけることである.

$$J = \int_0^{\infty} \{x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)\} dt. \quad (2)$$

ただし, Q , R は状態依存重み行列であり, Q は $n \times n$ 半正定対称行列, R は $m \times m$ 正定対称行列とする. 式 (2) を最小にする制御は状態フィードバック制御

$$u(t) = Kx(t), \quad (3)$$

$$K = -R^{-1}B^T P, \quad (4)$$

で与えられる. ここで, $P \in R^{m \times m}$ はリカッチ微分方程式は

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P - Q = 0, \quad (5)$$

を満たす $n \times n$ 正定対称行列である. シミュレーションで求めた入力を基にゲイン K を調整し, 本実験で用いたゲインを以下に示す.

$$K = \begin{bmatrix} 5.5 & -122.4 & 1.695 & -5.295 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3.3 実験結果

Fig.2,3(a) にマイコンから入力されるモータに入力する入力電圧を示し, Fig.2,3(b) に第 1 リンク角度, Fig.2,3(c) に第 2 リンク角度を示す.

まず, Fig.2,3(a) から, T_{s1} を遅らせたほうが小さいモータ電圧で制御が行えていることがわかる. 次に, Fig.2,3(b) より, T_{s1} , T_{s2} が一致した場合は第 1 リンクが $-60 \sim 50$ deg 以内で大きく回転することで安定状態を維持しているのに対し, T_{s1} を遅らせた場合は $-15 \sim 20$ deg 以内で回転し倒立安定化を実現している. 最後に, Fig.2,3(c) から, T_{s1} を遅らせると第 2 リンクに過渡的な振動が生じるため, 整定時間が比較的長くなるが, 時間経過とともに安定した制御が行えていると言える. すべての結果が良くなった要因として, T_{s1} を遅らせることで第 1 リンク角度が 0 近傍において第 2 リンクの制御の優先度が増し, より強く倒立安定を維持しようとした結果, 各要素の応答が向上したと考えられる. また, 第 1 リンクが目標値を中心として振動しているのは, 制御対象の線形モデル化が不十分であるか倒立振子の剛性が低いためであると考えられる.

4 結言

本稿では回転型倒立振子の振り上げ動作から始まる倒立安定化制御において, 意図的に異なるサンプリング周期にすることが最適レギュレータ法による倒立安定化に及ぼす影響について明らかにした. 不安定なシステムを制御する際にはサンプリング周期が短くなければならないとされているが, 回転型倒立振子において内部安定とされる第 1 リンク

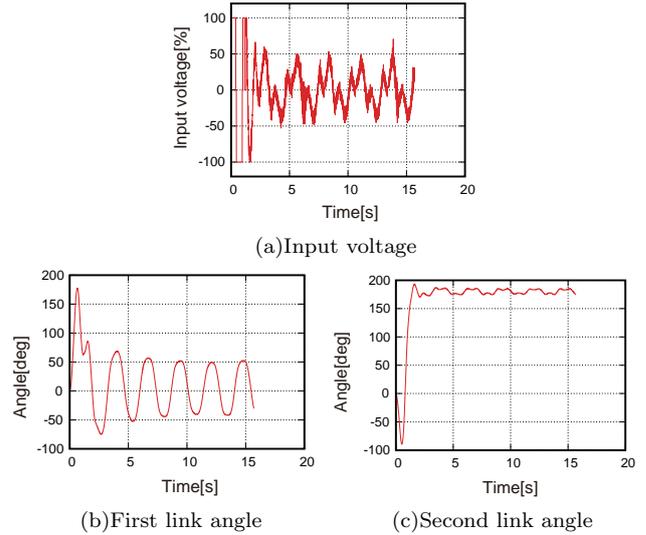


Fig.2 Single sampling period control ($T_{s1}=T_{s2}=5$ ms).

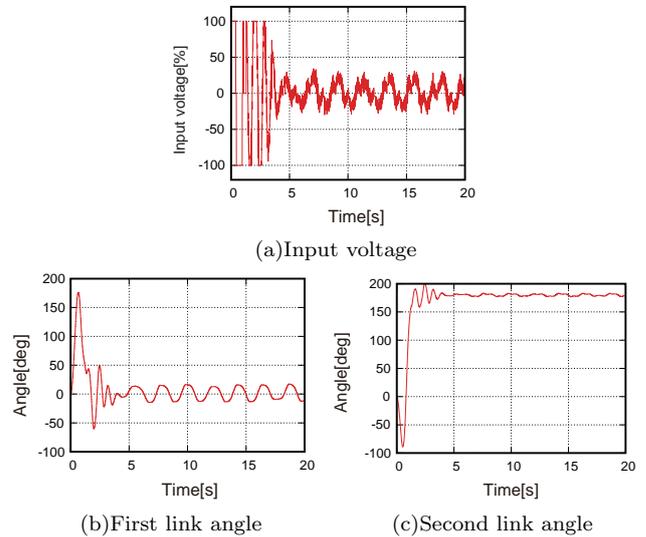


Fig.3 Dual sampling periods control ($T_{s1}=10$ ms, $T_{s2}=5$ ms).

クのサンプリング周期を遅らせることで第 2 リンクの制御が優先されるようになり, 倒立振子の挙動を改善した安定化制御が可能であることを示した. 今後は第 1 リンクを自由に動作させるために最適サーボ法を利用した目標値追従制御の実現を目指す.

謝 辞

本研究の一部は, JKA 補助事業 (27-146, 2018M-125) を受けて行われたものである.

文献

- (1) 荒井裕彦, "Underactuated Manipulator の非ホロノミック制御", システム/制御/情報, Vol. 43, No.10, pp.553-560,1999.
- (2) T.Mita, "Design of optimal strongly stable digital control systems and application to output feedback control of mechanical systems", International Journal of Control, pp.2071-2082, 1987
- (3) 井上 貴浩, 穂苅 真樹, "回転型倒立振子における異なる二つのサンプリング周期と制御性能評価: 簡易な制御系設計手法に基づくメカトロ実践教育プログラム設計に向けて (動作計画と制御の新展開 (2))", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P2-P01(1)-1P2-P01(4), 2014.

柔軟指を持つ3関節ロボットのなぞり動作による粗さ識別

Fingertip-tracing Control by a Soft-fingered three-joint robot for Roughness Identification

○学 福本 陽一 (岡山県大院), 正 井上 貴浩 (岡山県大)

Yoichi Fukumoto, Takahiro INOUE, Okayama Pref. Univ.

Key Words: fingertip-tracing, three-joint robot, surface roughness sensation, power spectrum

1 緒言

人手不足を背景として家事代行・作業代行ロボットの活躍が期待されている⁽¹⁾。人間の手の代わりにロボットハンドを用いて、物体の把持動作や操り動作を行うことになる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。そのためにはロボットが物体に関する物理情報を事前に取得する必要がある。その物体を特徴付けるものの一つである表面形状いわゆるテクスチャはツルツル、ザラザラ、凸凹といった情報のことを指し、その物体を把持し操るときの安定性に影響を与えると考えられる。つまりロボットハンドによる物体の滑らかな操り動作を実現するためには、その物体がどのようなテクスチャを有しているかを知ることが重要である。その際に視覚によって得られる情報だけではなく、実際に触ることによって得られる情報も必要になると思われる。しかし従来のロボットハンドの場合は物体と接触する指が剛体でできている場合が多く、剛性が未知の物体に触ったときに物体を傷付けてしまう恐れがある。そのため物体と触れるロボットハンドの指先は人間の指のように柔軟な構造を有していることが望ましい⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そこで本研究では多関節ロボットの先端に装着が可能かつ、物体との接触面に柔軟な素材を用いた指先を開発する。ここでは物体との接触面に圧力センサを内蔵した超軟質造形用樹脂 (以下、柔軟皮膚) を用いている。さらに指先上部に加速度センサを取り付けているため、機械的刺激である圧覚と振動覚を検出できる。そして提案する手法により本機構が未知の物体表面をなぞった場合に表面の粗さを識別する能力を有することを示す。

2 触覚検出センサとなぞり動作

2.1 センサシステム

人間は視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚という五感を通じて外界のあらゆる情報を感じ取る。中でも触覚は対象に触れることで発生する自身の器官の変形や温度変化を複合的な情報として受け取る。指先が対象物に触れたとき、変形に伴う圧力情報や、表面形状に沿うことで発生する振動情報などを指先で取得し、物体の識別を行っていると考えられる。そこで今回開発した指先は加速度センサと力センサからなる複合感覚センサである。指先部の構造を図1に示す。指の本体にはポリアセタール材 (以下、POM) を用いており、アクリル板との接触面が水平となるようにする。そのPOMにNITTA(株)のFlexiForce ボタンセンサが埋め込まれた柔軟皮膚を両面テープで貼付する。柔軟皮膚は人肌ゲルとも呼ばれ、人の肌の硬さに非常に近いものとなっている。FlexiForceの感圧部は円形で直径10mmの大きさである。柔軟皮膚の厚さはセンサを埋め込むことも考慮し3mmとする。埋め込まれた状態でキャリブレーション

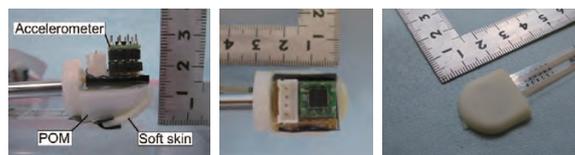


Fig.1 The structure of the fingertip.

Table 1 Relationship between searching action and tactile information (○ is effective motion, ⊙ is an extremely suitable motion, and ● is very suitable, and essential motion.)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Lateral motion	⊙	○	○				
Pressure	○	⊙	○				
Static contact	○		⊙		○	○	
Unsupported holding		○	○	⊙	○	○	
Enclosure	○	○	○	○	⊙	⊙	
Contour following	○	○	○	○	○	○	●

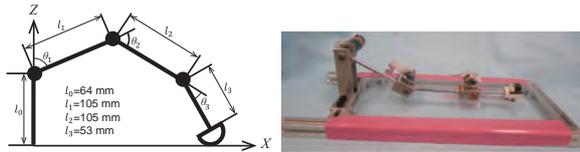
ションを行っている。そして指先上部に加速度センサを設置する。加速度センサは指先の振動によって発生する鉛直振動加速度を取得するために用いる。

2.2 触覚情報となぞり動作

手指によって触覚触感の判断が行われるため、動作が重要である。この触運動知覚の研究はこれまで多くなされている。視覚を用いず手触り感や質感などのテクスチャ、硬さ、重さ、形状等の触覚情報をどのような動きによって得られるか、その探索行為について調査されている。Ledermanら⁽⁷⁾によって得られた各動作と触覚情報の関係を表1に示す。表中の数字は取得したい触覚情報を示しており、①テクスチャ、②硬さ、③温度、④重さ、⑤体積、⑥全体の形、⑦細部の形状である。表中の○は目的とする触覚情報の取得において効果的な動作を、⊙は非常に適した動作を、●は必須動作をそれぞれ表している。表1より取得したい情報によって必要な動作がそれぞれ異なることが分かる。人間が物体表面のテクスチャを知るために行う動作として物体表面に沿うように指を動かすなぞり動作が挙げられる。なぞり動作は横方向の動きと圧迫を同時に行う動作でありテクスチャ検出に適していると考えられる。そのため今回の実験ではなぞり動作を採用する。

2.3 3関節ロボットとなぞり制御

なぞり動作を行う3関節ロボットのリンクモデルと今回使用する3関節ロボットの概形を図2に示す。可動域を広げるため人間の手指よりも各リンクが長くなるよう設計する。可動関節数は人間の手指の関節数に等しい。各リン



(a) Three-link robot model. (b) Three-link robot arm.

Fig.2 Apparatus of three-link robot.

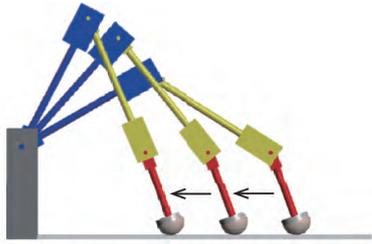


Fig.3 Robot motion in simulation.

クの長さの比率は人間の手指を参考にしている．加えて，一定の軌道を目指した場合に取得される力や加速度のデータ分析をするために，機構の指先端がアクリル板に沿うように軌道追従制御する．そしてセンサの出力を一定にするには接触状態が変化しないことが望ましい．ロボット先端のリンク姿勢を維持しつつなぞり動作を行うため $\theta_{const.} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ の条件を満たす制御を行う．次に，動作の流れを以下に示す．

- (i) 3秒間でなぞり開始姿勢にする．
- (ii) 2秒間静止し加速度センサの出力を安定させる．
- (iii) 15秒間なぞり動作を行う．

Matlab/simulink でシミュレーションを行う．なぞり動作中の様子を図 3 に示す．

3 粗さ識別評価実験

3.1 実験条件

本節では，開発したロボットによる粗さの識別能力を明らかにするための実験を行う．日本に広く流通し非常に安価で，粗さの違いを共通認識可能なサンドペーパーを対象物とする．用意したサンドペーパーは粒度 40, 80, 120, 240, 320, 600, 1000, 2000 の合計 8 種類である．粒度は研磨剤の粒子のサイズを表し，数字が小さいほど粗目であることを意味する．サンドペーパーを 50 mm × 30 mm の大きさに切り取り，進行方向と平行となるように事前に決めた位置に固定する．一定の力で押下したまま表面上を速度 10 mm/s でなぞらせる．なぞり中の押しつけ力は 0.7 ± 0.2 N とし，柔軟皮膚に埋め込んだ圧力センサによってなぞり中の押しつけ力を計測する．応答の傾向を把握するため試行回数はサンドペーパー 1 枚毎に各 5 回とする．

3.2 信号処理

なぞり中に計測した加速度のデータの FFT 解析を行いパワースペクトルを求める．すると 0 Hz 近傍と，30 Hz から 50 Hz の区間でパワースペクトルのピークが観測される．0 Hz 近傍のピークを第 1 ピークとし，30 Hz から 50 Hz の区間のピークを第 2 ピークとする．図 5 にサンドペーパーの粒度と，そのパワースペクトルの第 2 ピーク周波数との関係を示す．横軸はサンドペーパーの粒度を対数スケールで表している．縦軸は各サンドペーパー 5 回の第 2 ピーク周波数の平均を表している．黒の実線は最小二乗



Fig.4 Sand paper.

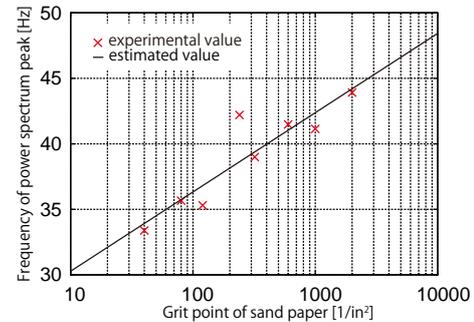


Fig.5 This figure shows that frequency of power spectrum peak is proportional to the logarithm of the grit point of sand paper.

法によって求めた近似直線である．精度よく近似していることが分かる．したがって加速度のパワースペクトルの第 2 ピーク周波数はサンドペーパーの粒度の対数に比例するといえる．よってこの粒度と照らし合わせることで未知の物体の表面の粗さを識別することが可能であると考えられる．

4 結言

本稿では，開発した柔軟指先の粗さ識別実験の結果を通じて，提案する手法により本機構が粗さが未知の物体表面をなぞった場合に表面の粗さを識別する能力を有することを示した．

謝 辞

本研究の一部は，JKA 補助事業 (27-146, 2018M-125) を受けて行われたものである．

文献

- (1) 中島正博, 小坂祥太, 松浦英雄, 福田敏男, “柔軟材料の変形を利用した圧電振動型触覚センサによるすべり検出”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.76, No.764, pp.930–935, 2010.
- (2) Joseph M.R. Katherine J.K. “Methods for Robotic Tool-Mediated Haptic Surface Recognition”, IEEE Haptics Symposium, pp.49–56, 2014.
- (3) H Hu, Y Han, A Song, S Chen, C Wang, Z Wang “A finger-shaped tactile sensor for fabric surfaces evaluation by 2-dimensional active sliding touch”, Sensors, vol.14, pp.4899–4913, 2014.
- (4) 村上剛司, 長谷川勉, “器用な多関節多指ロボットハンドのための柔軟被覆と爪を有する指先”, 日本ロボット学会誌, vol.22, No.5, 2004.
- (5) 多田泰徳, “内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指”, 日本ロボット学会誌, vol.23, No.4, pp.482–483, 2005.
- (6) 井上貴浩, 藤井郁夫, Dzong V. D., 杉山進, 平井慎一, Qiang W. “マイクロフォース・モーメントセンサ埋め込み型柔軟指先の製作と圧縮実験による評価”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.73, No.736, pp.3228–3233, 2007.
- (7) S.J.Lederman and R.L.Klatzky, “Hand Movements:A window into Haptic Object Recognition”, Cognitive Psychology 19, p.365, 1987.