小型・低摩擦アクチュエータ MagLinkageの開発とハンド応用

Development and Application of Low-friction, Compact Size Actuator "MagLinkage"

○正 小山佳祐 (東大) 正 下条 誠 (東大)正 妹尾 拓 (東大) 正 石川正俊 (東大)

Keisuke Koyama, University of Tokyo, Keisuke_Koyama@ipc.i.u-tokyo.ac.jp Makoto Shimojo, University of Tokyo Taku Senoo, University of Tokyo Masatoshi Ishikawa, University of Tokyo

We develop a compact size, low friction actuator "MagLinkage" and realize dynamic shock absorption control for catching of light object with a robot hand. The actuator is consisted of compact size direct-drive motor, magnet gear and low gear ratio planetary gear. The magnet gear translates motor rotation axis to vertical direction with extremely low friction. And the planetary gear reduces rotation speed appropriately for robotic hand application. In this paper, we describe specifics, dynamic response, friction/cogging torque model and catching a light weight object with shock absorption control.

Key Words: Multi-fingered hand, High-backdrivability

1 はじめに

本論文では、小型・高バックドライブアクチュエータ"MagLinkage"を開発し、その性能を検証する.さらに、ロボットハンド応用の一つとして、衝撃吸収キャッチを実現する.図1(a)にMag-Linkageを8個用いた多指ハンド(MagLinkageハンド)を示す. 同図(b)に示す通り、MagLinkageでは、小型ダイレクトドライ ブモータの回転軸を磁石歯車により直交変換し、遊星減速機で回 転速度をロボット応用に適した速域まで減速する.ダイレクトド ライブモータ、低減速比の遊星減速機、磁石歯車の組み合わせに より、低摩擦・低バックラッシが実現されているため、バックド ライバビリティが非常に優れている.また、モータの長手方向と 出力軸が直交した位置関係にあるため、小型ハンド・脚ロボット を構成しやすい.MagLinkageハンドを用いることで、衝撃吸収 制御(Maxwellモデル制御)を外界センサレス・サーボ制御のみ で実現した.ロボットハンドにおいて、サーボ制御のみで衝撃吸 収制御を実現した例はこれまでになく、本研究が初の報告である.

アクチュエータのバックドライバビリティを向上するために, トルクセンシングと摩擦補償制御を組み合わせる手法 [1] や,出 力軸のバックラッシを利用する制御手法 [2] が提案されている. しかしながら,小型ロボットハンドや脚ロボットを構成する際に 問題となる「アクチュエータと出力軸の配置」は考慮されていない. 一方,油圧駆動アクチュエータを用いた高バックドライバブ ルハンド [3] の開発例もあるが,油漏れし辛く,かつ応答性の良 い小型油圧駆動アクチュエータの入手は現在でも難しい.最近は, 高バックドライバビリティな Series Elastic Actuator(SEA) が 何種類か販売されているが,サイズが大きい問題がある.また, アクチュエータの出力軸が対象物や環境と接触した際に,接触を 維持しながら衝撃を吸収する高応答な力制御が可能かは検証され ていない.従って,多指ハンドや脚ロボットをコンパクトに構成 可能な小型・高速・高バックドライブアクチュエータを新たに開 発する必要がある.

2 仕様

開発した MagLinkage ハンドの主な寸法・仕様を図 1(c) と 表 2 に示す.指先から DIP(指先)関節間のリンク長 60.5 mm, DIP 関節から PIP(根元)関節間のリンク長 77 mm であり,指 幅 35 mm である.バックドライバビリティが優れたハンドの中 では最小クラスのサイズである.速度域とトルク域は定格スペッ クの高速ハンドと同等の性能を目指してアクチュエータ,減速機, 磁石歯車を選定した.PIP 関節では大トルクを発揮するために,



Fig.1 (a) Over view of MagLinkage hand, (b) schematic diagram of MagLinkage and (c) specifics of the hand.

Table 1 Specifics of DIP and PIP joint

	DIP joint	PIP joint
Gear ratio [-]	1/16.4	1/16.4
Max joint speed [rpm]	182	182
Max torque [Nm]	0.41	1.0
Backlash [degree]	0.5	0.5
Angle range [degree]	-90 to 90	-90 to 90
Encoder resolution [p/r]	500	72000
Weight [g]	110	170

PIP joint motor: MDS-2018 (MTL Inc.), magnet gear: FD22S-C-SA (FEC Inc.) DIP joint motor: MDS-1318 ($^{\rm (*)}$), magnet gear: FD22-C-SA ($^{\rm (*)}$)

直径 18 mm の DD モータ (MDS-2018, マイクロテック・ラボラ トリー株式会社) と高トルクタイプの磁石歯車 (FD22S-C-SA, 株式会社エフ・イー・シー)を採用した.一方, DIP 関節は小サ イズと滑らかな回転の実現を重視し,直径 13 mm の DD モータ (MDS-1318)と低コギングタイプの磁石歯車(FD22-C-SA)を 用いた.

最大トルクは DIP(指先)関節で 0.41 Nm, PIP(根元)関節 で 1.0 Nm であり,最大回転速度は両関節共に 182 rpm である. 減速比は高速ハンド [4] が 1/50~1/100 であるのに対し,本ハン ドでは両関節共に 1/16.4 である.定格スペックの高速ハンドを 基準にすると,DIP 関節の最大トルクは 2.1 倍,PIP 関節の最 大トルクは 1.1 倍であり,減速比を小さくしつつトルクアップを 実現した.ただし,1指2関節モジュールの重量は,高速ハンド が 110g であるのに対し,本ハンドは 280g である.また,各関 節の最高回転速度は定格スペックの高速ハンド基準で 0.9 倍であ る.従って,高速位置決め制御には高速ハンドが適しており,高 ダイナミックレンジでの力制御には本ハンドが適している.

表2にDIP・PIP 関節のモータ軸側での静止摩擦トルク,クー ロン摩擦トルク,粘性摩擦トルクを示す.静止摩擦トルクはモー

 Table 2 Specifics of friction torque

	DIP joint	PIP joint
Static friction torque ^{*1} [Nm]	4.0E-3	1.68E-2
Viscous friction torque ^{$\times 2$} \hat{D} [Nm]	3.98E-5	3.72E-4
Coulomb friction torque ^{≈ 2} \hat{C} [Nm]	3.37E-4	1.14E-2

%1: Experimental value, at motor shaft

% 2: Estimated value using MD method, at motor shaft

タに三角波状のトルク指令を十分低速で与えた際にモータ軸が回 転を始めた時点のモータトルク指令値である.一方,クーロン摩 擦トルクと粘性摩擦トルクは、4章の1リンク1慣性モデルを仮 定し,MD 同定法 [5] で推定した値である.DIP 関節のモータ (MDS-1318)の瞬時最大トルクは0.025 Nm であるのに対し,静 止摩擦力は4.0E-3 Nm であるため,瞬時最大トルクを基準にす ると静止摩擦による損失は16%である.また,PIP 関節のモータ (MDS-2018)の瞬時最大トルクは0.13 Nm であり,静止摩擦力は 1.68E-2 Nm であるため,同基準で静止摩擦による損失は13%で ある.両関節共にモータ瞬時最大トルクを 100%とすると静止摩 擦による損失は16%以下であり,直行軸変換を含む減速機系と しては極端に摩擦が小さい.

3 角度·角速度追従特性

DIP・PIP 関節の角度・角速度の応答特性を検証するために, PD 制御式(1)による目標角度への追従実験を行った.

$$\tau_{\rm ref-i} = K_{\rm p-i}(\theta_{\rm ref-i} - \theta_{\rm i}) - K_{\rm d-i}\theta_{\rm i} \quad (i = 1, 2) \qquad (1)$$

 τ_{ref-i} は関節 i のトルク指令値であり, K_{p-i} は比例ゲイン, K_{d-i} は微分ゲインである. θ_1 が DIP 関節の角度であり, θ_2 が PIP 関節の角度である. 各軸順番に角度目標値を式 (2) で与え, $0\sim 2s$ 間, 目標値をスイープさせた. なお, 連成振動の影響を除去するために, 駆動しない関節は固定して実験を行った.

$$\theta_{\text{ref}-i} = \frac{\pi}{6} \sin(2\pi t^2) \quad (i = 1, 2)$$
(2)

図2・3 に DIP 関節と PIP 関節を PD 角度制御した際の角度・ 角速度応答を示す.両図共に左側が角度で,右側が角速度である. なお角速度は角度を微分して計算した.グラフ内の点線(黒色) は目標角度値または理想速度値を示している.図2より,DIP 関 節は角度・角速度共に目標値への追従性能が良い.DIP 関節は低 コギング磁石歯車を採用したことで,摩擦・コギング補償なしで 滑らかな角度・速度制御が可能である.一方,図2より,PIP 関 節は -5 ~ 5 rad/s の速度域で速度の脈動が生じている.PIP 関 節にはトルクを重視して大トルク磁石歯車を採用したが,この結 果,磁石歯車のコギングトルクが無視できないレベルとなり,速 度の脈動が生じたと考えられる.



Fig.2 (Left) DIP joint angle and (Right) angular velocity when PD control



Fig.3 (Left) PIP joint angle and (Right) angular velocity when PD control

4 摩擦・コギングトルクモデルと補償制御

より滑らかに PIP 関節角度・速度を制御するために,摩擦・コ ギングモデルを導入する.モデルを単純にするために,1リンク 1 慣性系とし,磁石歯車のコギングトルクは cos 波形で近似する. この摩擦・コギングトルクモデルを式(3)に示す.

$$I\theta_{2-m} + D\theta_{2-m} + C \operatorname{sgn}(\theta_{2-m}) - \sum_{i=1.8} C_i \cos(i\theta_{2-m} + \theta_{\text{offset}-i}) = \tau_{\text{ref}-2} - \tau_{\text{offset}-2}$$
(3)

式(3)の左辺第一項目が慣性力,二項目が粘性摩擦力,三項目が クーロン摩擦力,第四項がコギングトルクである. θ_{2-m} は PIP 関節のモータ角度であり,*I*は慣性モーメント,*D*は粘性摩擦係 数,*C*はクーロン摩擦係数,*C*_iはコギングトルク係数, $\theta_{offset-i}$ はコギング波形の位相である.一方,右辺第一項はトルク指令, 第二項はトルク指令のゼロ点オフセット誤差である.これらのパ ラメータ値は MD 同定法と適当なステップ応答から求めた.な お,摩擦・コギングトルク項のパラメータ同定手法の詳細とその 精度評価については改めて報告する.摩擦・コギングトルク項の パラメータ同定値 [$\hat{D} \hat{C} \hat{C}_1 \hat{C}_8 \theta_{offset-1} \theta_{offset-8} \tau_{offset-2}$]から 式(4)により摩擦・コギング補償を行う.

$$\tau_{\rm ref-2} = \tau'_{\rm ref-2} + D\dot{\theta}_{\rm 2-m} + C\,\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{\rm 2-m}) -\sum_{i=1,8} C_i \cos(i\theta_{\rm 2-m} + \theta_{\rm offset-i}) + \tau_{\rm offset-2}$$
(4)

 τ'_{ref-2} は PD 制御によるトルク指令値や衝撃吸収制御のトルク指令値である.

図4に摩擦・コギングトルク補償制御の効果を示す.図4は 縦軸が角速度,横軸は時間であり,黒線が理想値,青色がPD制 御のみの場合での角速度値,赤色がPD制御と摩擦・コギングト

No. 19-2 Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019



Fig.4 PIP joint angle when PD control with no compensation and friction, cogging torque compensation

ルク補償制御を組み合わせて実行した際の角速度値である. 同図 より,補償制御を用いることで,0~2 rad/s内での追従特性が向 上し,明らかに速度の脈動が減少した.しかし,-5~0 rad/sの 区間では,補償制御を用いた場合の方が速度の脈動が増加してい る.このため,現状のモデルでは関節回転方向の切り替わりを含 むタスクで滑らかに角度・角速度を制御することは困難である. ただし,物体の衝撃吸収キャッチタスクでは,一方向に滑らかに 角度・角速度を制御できれば良いため,本モデルを用いる.

5 衝撃吸収キャッチ

MagLinkage は摩擦が極端に小さい機構であるため、小さい外 力が加わった際でも関節がバックドライブし、この回転量をモー タ側エンコーダで正確に計測できる.この特徴は、外界センサレ スで精度の高い把持力の推定や、インピーダンス制御を行う際に 有利である.本論文では、本研究室が提案している直列インピー ダンス制御(Maxwell モデル制御)が MagLinkage ハンドによ り実現可能か検証した.

通常のインピーダンス制御ではバネとダンパを並列接続した voigt モデルが用いられるが、物体や環境と衝突した後に初期位 置に戻ろうとする反力が必ず発生する.この反力は、物体を高速 キャッチする際に弾き返す原因となる. そこで, 妹尾ら [6, 7] は バネとダンパを直列接続した Maxwell モデルを用いる制御方法 を提案している. Maxwell モデルでは, 塑性変形的な挙動(初期 位置に戻ろうとする反力が発生しない)を実現するため、軽量物 体を弾き返さずにキャッチする場合に有効である.本手法は,ハ ンド指先関節で仮想的なバネ力を発生させ、このバネ力のフィー ドバックに基づき根元関節をダンピング制御することで直列接続 されたバネ・ダンパモデルを表現する.シミュレーション [7] や 実バネをアクチュエータの手先に取り付けて変位を計測するこ とで物体を弾き返さずにキャッチする例 [6] がこれまでに示され ている.しかしながら,機構系の摩擦の問題と接触を維持するこ との難しさにより、ロボットハンドにおいてサーボ制御のみでの Maxwell モデル制御はこれまでに実現されていない.

5.1 制御式

本論文では、MagLinkage の高いバックドライバビリティを 生かして、Maxwell モデル制御を実現する.従来手法では位置 ベース制御が用いられてきたが、この手法では摩擦の影響を位置 制御ループで小さくできる反面、物体と指先との接触を保つた めには非常に高い制御応答性が必要になり安定した制御が難し かった.そこで、本論文では、トルクベース制御を用いることで、 MagLinkage の高バックドライブ特性を生かし、物体と指先との 接触を保ちやすくする.

図 5 に示す通り,指先に仮想的なバネを設定し,DIP 関節の 初期角度 $\theta_{\text{initial}-2}$ を基準にして式(5)により仮想バネ力 F_{spring} を計算する.

$$F_{\rm spring} = 2K_{\rm s}K_{\rm g}L_1\cos(\theta_{\rm s1}) \tag{5}$$

$$K_{\rm s}$$
 は仮想バネのバネ定数, $K_{\rm g}$ は減速比, L_1 は指面の中心から



Fig.5 Schematic diagram of one finger with maxwell model

DIP 関節までのリンク長であり、 θ_{s1} は仮想バネの軸方向と L_1 リンクのなす角度である。そして仮想バネ力 F_{spring} を用いて DIP 関節のトルク目標値 τ_{ref-1} を式(6)で与える。

$$\tau_{\rm ref-1} = \frac{F_{\rm spring}}{K_{\rm g}} L_1 \sin(\theta_{\rm s1}) \tag{6}$$

 θ_{s2} は L_1 リンクと L_{0-2} 仮想リンク(指面の中心から PIP 関節 との間の距離)のなす角度である.一方, PIP 関節のダンピング トルクは F_{spring} の微分値を使用し,式(7)で与える.

$$\tau_{\rm ref-2}' = \frac{K_{\rm d}}{K_{\rm g}} \dot{F}_{\rm spring} L_{0-2} \sin(\theta_{\rm s1} + \theta_{\rm s2}) \tag{7}$$

 $K_{\rm d}$ は仮想ダンパの粘性係数である.式(6)と(7)により,直列 接続された仮想バネ・ダンパを手先座標基準で表現し,Maxwell モデルの塑性変形の挙動を実現する.

5.2 実験

トルクベース Maxwell モデル制御で軽量物体を弾かずにキャッ チ可能か検証した.物体は 100gの鉄製円柱とし,傾斜上を転が せて加速させた後に水平面上で1指2関節モジュールの指先に 衝突させた.なお,指先はアルミ平板を用いた.実験の再現性を 高めるために,指先面と物体,実験装置の表面に約0.2mm厚の 滑り止めテープを貼りつけた.

図6にキャッチの様子を示す.図6(a)に示す通り、トルクベース Maxwell モデル制御を用いることで物体を弾かずに接触を保ち続けることができた.一方、図6(b)では、PIP 関節の摩擦・コギングトルク補償制御を OFF にした場合であり、同図(c)では PIP 関節のダンピング制御ゲインを0とし、DIP 関節のバネ挙動のみでキャッチした際の様子である.(b)(c)の場合は、接触後に物体を弾き返してしまい、接触を維持することはできなかった.

図 7 にキャッチ時の仮想バネ反力を示す.比較のために, Maxwell モデル制御 (a) の他,摩擦・コギング補償制御 OFF(b), PIP 関節のダンピング制御ゲイン 0(c) での結果をプロットして ある. (a) の場合で最も撃力が小さく,かつ接触時間も増加してい る. (a) では仮想バネ力のピークが二つあるが,これは Maxwell モデル制御のダンピング制御ゲインを比較的大きく設定したため, 一度目の衝突の後にわずかに物体から指先が離れ,その後二回目 の衝突が起こったためである.連続的に接触を維持し続けるため にはダンピングゲインを適切に設定することと,静止摩擦を補償 する方法が必要である.

以上の結果から、MagLinkage ハンドとトルクベース Maxwell 制御,摩擦・コギングトルク補償制御の組み合わせにより、物体 衝突時の撃力の低減と接触時間を増加させることが可能である. これらの効果により、軽量物体を跳ね返さずにキャッチすること が可能となった.

6 結論

本論文では、新しい小型・低摩擦アクチュエータの性能を評価 し、さらに、ハンド応用としてこのアクチュエータと Maxwell モデル制御を用いた衝撃吸収キャッチを実現した.小型ダイレク



Fig.6 (a) Maxwell model-based catch with torque compensation, (b) Maxwell model-based catch with no compensation, (c) only stiffness control of DIP joint



Fig.7 Virtual spring force when catching with (a) Maxwell model-based with torque compensation, (b) Maxwell model-based catch with no compensation, (c) only stiffness control of DIP joint

トドライブモータ、遊星減速機の組み合わせにより、減速比を小 さくしつつ、かつトルクアップを達成した. 磁石歯車を用いて回 転軸を直交変換することで、極めて高いバックドライバビリティ を持つ多指ハンドを小型サイズで実現した. この他、磁石歯車の メリットとしては、メンテナンスフリー、トルクリミッタ機能の 付加がある.

ただし,アクチュエータ全体の重量が重いことが欠点であり, 今後,更なる軽量化が必要である.また,PIP 関節は低速域にお いて磁石歯車のコギングトルクによる回転速度の脈動が発生する 問題がある.この問題に関しては摩擦・コギングトルク補償制御 を用いるか,磁石歯車の更なる低コギング・高トルク化が必要で ある.本論文では,単純な摩擦・コギングトルクモデルによる補 償制御を導入したが、回転方向が切り替わる場合には更に高精度 なモデルが必要である.ただし、ボールキャッチのように、一方 向のみに滑らかに関節を駆動することが重要であるタスクでは、 本論文の補償制御は有効である.開発したアクチュエータを用い ることで、Maxwell モデル制御を用いた衝撃吸収キャッチを初め てサーボ制御のみで実現した.実験結果から、物体との衝突によ る撃力の発生時間は 180~280 ms と極めて短く、この短い時間内 に衝撃を低減するためには、高バックドライバビリティな機構と 高速なトルクベース制御の組み合わせが有効である.

今後は高速ビジョンセンサや高速・高精度近接覚センサとの組 み合わせにより、より高度で高速なキャッチタスクや製品の組立 タスクの高機能化を目指す.

謝辞

本研究を遂行するに当たり、マイクロテック・ラボラトリー株 式会社,株式会社信電舎,株式会社エフ・イー・シーから多大な る技術的なご支援を頂いた.ハンドの小型・高性能化にご協力頂 いた青柳 雄大様,野村 優介様,石井 智依様(マイクロテック・ ラボラトリー),遊星減速機の製作を担当して頂いた宇田川和将 様,小田 一雄様(信電舎),磁石歯車の特性・ノウハウに関して ご助言頂いた徳永 勝義様(エフ・イー・シー)には、この場を借 りて心より感謝致します.

参考文献

- S. Ishikawa, M. Nishio, and T. Sugihara: Low-cost Backdrivable Motor Control Based on Feed-forward/Feed-back Friction Compensation, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5026–5031, 2015.
- [2] 山田翔太,藤本博志:負荷側エンコーダ情報及びバックラッシを利用した位置制御に基づく高バックドライバビリティ制御の提案,メカトロニクス制御研究会,MEC-16-025,2016.
- [3] H. Kaminaga, T. Yamamoto, J. Ono and Y. Nakamura: Backdrivable miniature hydrostatic transmission for actuation of anthropomorphic robot hands, 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 36-41, 2007.
- [4] 今井睦朗, 並木明夫, 橋本浩一, 金子真, 石川正俊: 視覚フィードバッ クを用いた高速ハンドシステムの開発, 日本ロボット学会創立 20 周 年記念学術講演会/講演論文集, 3E11, 2002.
- [5] 大明準治:ロボット運動制御のための2リンク2慣性系の非干渉 化同定法,慶應義塾大学大学院理工学系研究科学位論文博士(工 学),2009年度.
- [6] Taku Senoo, Masanori Koike, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Visual Shock Absorber Based on Maxwell Model for Anti-Rebound Control, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Hamburg, Germany, 2015.9.29) / Proceedings, pp. 1640-1645.
- [7] Taku Senoo, Masanori Koike, Kenichi Murakami and Masatoshi Ishikawa: Impedance Control Design Based on Plastic Deformation for a Robotic Arm, CASE 2016 (Fort Worth, Texas, 2016.8.23) / IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 1, pp. 209-216, 2017.

No. 19-2 Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019