

IPMC センサを用いたソフトグリッパの曲率推定

○竹林 龍之介 (立命館大学), 松野 孝博 (立命館大学), 杉野 卓司 (産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門), 堀内 哲也 (産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門), 物部 浩達 (産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門), 平井 慎一 (立命館大学)

Curvature Estimation of Soft Gripper Using IPMC Sensor

○Ryunosuke TAKEBAYASHI(Ritsumeikan University), Takahiro MATSUNO (Ritsumeikan University), Takushi SUGINO(AIST NMRI), Tetsuya HORIUCHI (AIST NMRI), Hirosato MONOBE (AIST NMRI), and Shinichi HIRAI(Ritsumeikan University)

Abstract: In this paper, the curvature of a soft gripper is estimated using an IPMC sensor. First, we experimentally derive the relationship between the curvature of the soft gripper with IPMC sensor, the sensor voltage, and the applied air pressure. Then, the model equation of the sensor voltage and the gripper curvature is obtained. Also, a curvature estimation system using the obtained model equation is implemented with MATLAB/Simulink. Finally, we validated the estimation accuracy of the developed curvature estimation system.

1. 緒言

現在, 日本では1日に数百万個もの弁当が製造されている[1]. このような食品のハンドリング作業は, 主に人の手によって行われている. しかし, 日本の労働者は賃金が高く, また消費期限の問題から海外で製造しコストを下げることは難しい. 加えて, 日本では少子高齢化という社会問題から, 今後はより労働者の確保が難しくなることが予想される. 以上の理由から, 食品ハンドリングの自動化が望まれている. 食品を把持する際の課題として, 食品の大きさや形状のばらつき, 食品の傷つきやすさなどが挙げられる. これらの課題に対応できるエンドエフェクタとして, エラストマやファイバーなどの柔軟な材料で構成されたソフトロボットハンドが提案されており, 食材のハンドリングに成功している[1]. 一方で, ソフトロボットハンドにおけるセンシングについては, まだ確立された手法が存在しない. 食品のパッキング作業などの自動化を想定した場合, 把持した食品のサイズ, 形状, 把持の成否の判別などが必要になる.

以上より, 本研究では柔軟な曲げセンサである, IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)センサをソフトグリッパ(空気圧駆動型柔軟指)に内蔵し, グリッパの曲率を推定することを目的とする. グリッパの曲率を推定することで, 将来的に把持の成否の判別や把持物体のサイズ推定を可能にすることを目標とする.

2. IPMC センサ内蔵ソフトグリッパ

2.1 IPMC センサの原理と特性

IPMC センサの構造を Fig.1 に示す. IPMC センサは,

2枚の金属極と, イオン導電性高分子ゲルによって構成されている. センサ全体が曲げ変形すると, センサ内部に曲げによる圧力が生じる. 発生した圧力により陽イオンが曲げの外側方向に移動するため陽イオン分布に偏りが生じ, 電圧が発生する. また, この電圧は曲率依存する[2].

IPMC センサに類似した曲げセンサとしては, 静電容量式や圧電式の曲げセンサが挙げられる. しかし静電容量式のセンサは, センサが大きく伸長する必要があり, 設置場所が限定されるという問題点がある. また, 圧電式のセンサは, 電圧が一時的にしか出力されないため, 積分などの操作が必要であり, ノイズによる誤差が大きくなるという問題点がある. それに対して, IPMC センサは曲げに対して一定の電圧を維持する特性を持つため, ソフトグリッパのセンシングに適している.

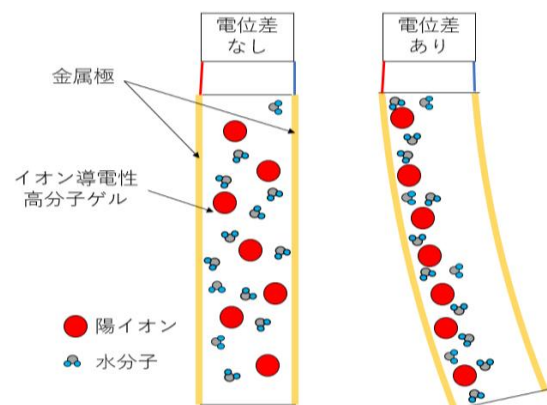


Fig. 1: IPMC センサの構造

2.2 IPMC センサ内蔵グリッパ

ソフトグリッパ(空気圧駆動型柔軟指)は Fig. 2 に示す構造をしており、空気圧を加えることで、チャンバ一部分が膨らみグリッパが曲がる。グリッパの動作の様子を Fig. 3 に示す。空気圧はコンプレッサで圧縮した空気を電空レギュレータで減圧、調整し印加する。また、内蔵された IPMC センサより得られた電圧から、グリッパの曲率を推定する。

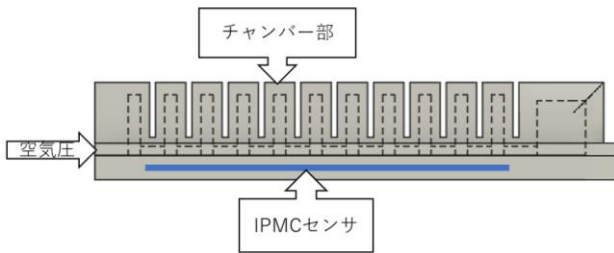


Fig. 2 : 柔軟指の構造

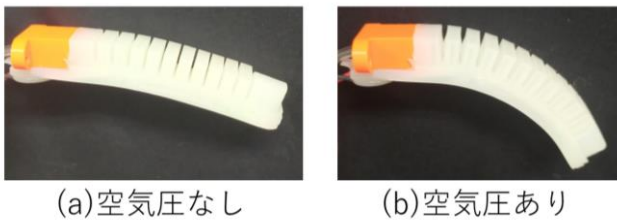


Fig. 3: 柔軟指の動作

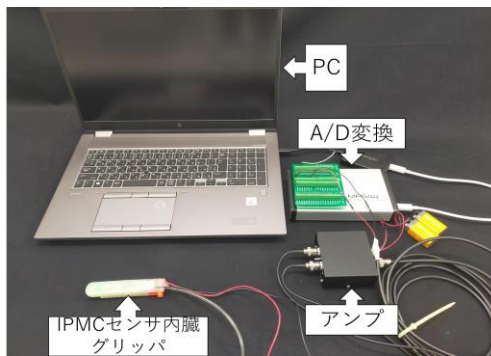


Fig. 4: 実験システム

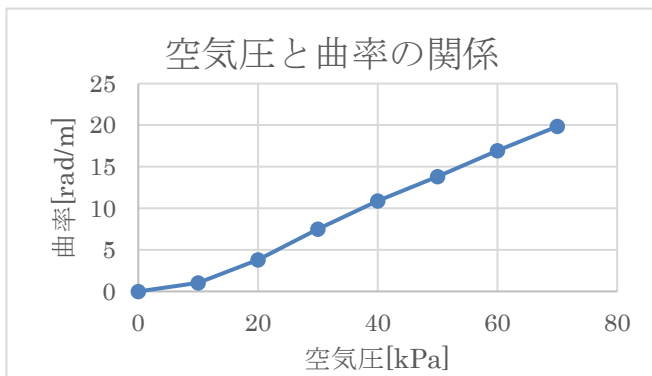


Fig. 5: IPMC センサ内蔵グリッパの空気圧-曲率関係

3. IPMC センサ内蔵ソフトグリッパの曲率推定

3.1 実験システム

本実験では、IPMC センサから得られた電圧を Fig. 4 のような装置を使用し検出する。初めに、IPMC センサから得られた電圧を電圧アンプ(T-01HGA)にて、1000倍に増幅する。次に増幅された電圧値を A/D 変換器(MH644)によりデジタル値に変換し、PC で解析する。以降では曲率 0 の電圧値を 0V とし、電圧値は 5 秒間測定した平均値とする。信号の解析には、MATLAB/Simulink を使用する。

3.2 実験方法

本節では、センサから得られる電圧値と、グリッパの曲率、印加する空気圧との関係について調べる。

初めに、IPMC センサ内蔵グリッパに空気圧を印加した時の、グリッパの曲率を Fig. 5 に示す。印加した空気圧は 0kPa~70kPa まで 10kPa 刻みである。

次に、電圧値と曲率、空気圧の関係を調べる実験方法について説明する。実験方法としては、Fig. 6 のようなガイドにグリッパを固定し、曲率を一定にする。その状態で、空気圧を 0kPa~70kPa (10kPa 刻み) まで印加し、その時の電圧値を測定する。またガイドの曲率は、Fig. 5 の空気圧と曲率の関係に従うように設計する。

上述の実験を 3 度行い、その結果の平均値を Fig. 7 に示す。結果より、空気圧を印加した場合と印加しない場合で出力する電圧が異なることが分かった。また、曲率が一定の場合、印加する空気圧が大きいほど電圧が小さくなることが確認できた。

3.3 実験式の導出

本節では、Fig. 7 で示した空気圧と曲率-電圧の関係

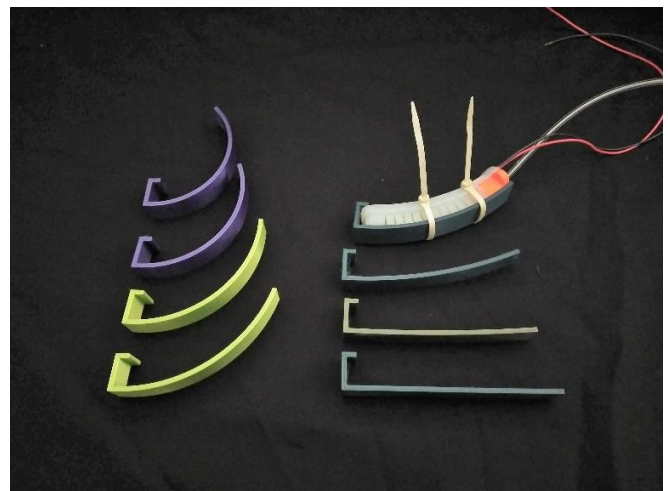


Fig. 6: 曲率固定ガイド

を、モデル式として導出する。

導出方法としては、Fig. 7 で得られたそれぞれのデータに対して二次関数のフィッティングを行いモデル式を導出する。本実験では、MATLAB の Curve Fitting Toolbox の fit 関数を使用した。フィッティングした結果を Fig. 8 に示す。

また、モデル式は次のように表すことができる。ここで曲率を κ 、電圧を V 、係数を k とする

$$V = k_{1i}\kappa^2 + k_{2i}\kappa + k_{3i} \quad (1)$$

係数の添字 i は印加した空気圧 i kPa を示す。フィッティングの結果を Table 1 に示す。

Table 1: フィッティング結果

i	k	k_{1i}	k_{2i}	k_{3i}
0	0.00044	0.0323	-0.01363	
10	0.000596	0.03432	-0.2073	
20	0.000789	0.03409	-0.3706	
30	0.001046	0.03262	-0.5473	
40	0.00126	0.03269	-0.7521	
50	0.001446	0.03422	-0.9843	
60	0.001743	0.03232	-1.196	
70	0.001897	0.03369	-1.417	

3.4 曲率推定システム

本節では、3.3 節で求めたモデル式を用いて、センサより得られた電圧から、リアルタイムでグリッパの曲率を推定し、視覚化するシステムを作成する。

曲率は、式(1)を解くことによって求めることができる。ここで曲率 κ [rad/m]は正の数であるので、解の公式より

$$\kappa = \frac{-k_{2i} + \sqrt{k_{2i}^2 - 4k_{1i}(k_{3i} - V)}}{2k_{1i}} \quad (2)$$

と求めることができる。

式(2)と Table 1 の係数を用いることによって、リアルタイムでのグリッパの曲率推定と、グリッパの変形をグラフ表示することができる。システムは MATLAB/Simulink を用いて作成し、空気圧とセンサの電圧値を入力として与える。

曲率推定システムの実行結果を Fig. 9(1~3)に示す。

Fig. 9(1~3)は、それぞれ空気圧 20, 40, 60kPa 印加したときの結果である。

3.5 曲率推定システムの評価

本節では、3.4 節で作成した曲率推定システムを評

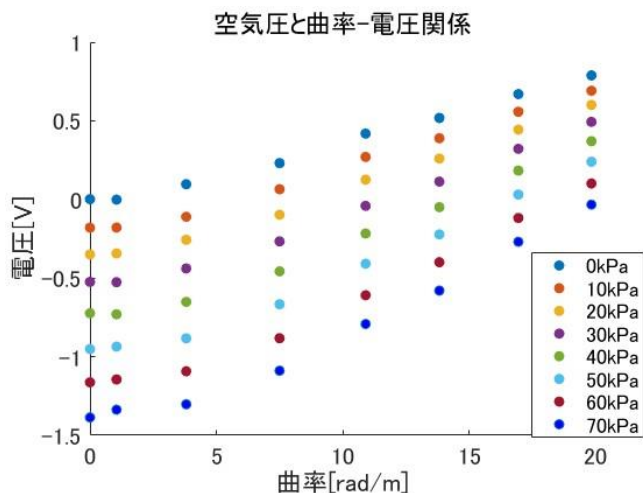


Fig. 7: センサ内臓グリッパの曲率-電圧と空気圧の関係

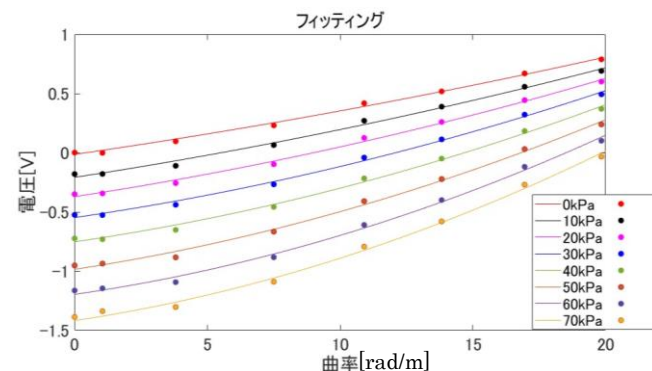


Fig. 8: 計測結果の二次関数によるフィッティング

価する。Fig. 5 で使用した曲率のそれぞれの中間値に対して曲率推定を行い、この曲率の推定値を精度評価に用いる。曲率の固定方法は、3.2 節と同様に、曲率を固定するガイドを使用する。評価に用いたガイドの曲率を Table 2 に示す。このガイドにグリッパを固定した状態で、それぞれの曲率に対して、0kPa~70kPa まで空気圧を印加する。それによって得られたセンサ電圧をシステムに入力し曲率を推定した。曲率の推定結果を Fig. 10 に示す。点で示した値がシステムによる推定結果であり、 x 軸に平行な実線が実際のガイドの曲率である。Fig. 10 より、センサ電圧から推定した曲率の推定値が実際の曲率と近いことが確認できる。続いて推定値の精度について検証する。それぞれの空気圧を印加したときの誤差の最大値、最小値、平均値、分散を Table 3 に示す。Table 3 より空気圧が 10kPa の場合に最も推定精度が高く、70kPa で最も精度が悪くなる。最後に、曲率の誤差によるグリッパの指先位置への影響について考える。Fig. 11 に示すように、外力によって円弧に変形したグリッパの指先位置の変位を y とする。また、円弧の長さを L とする。誤差がない場合、指先位置の変位 y は次の式で表される。

$$y = \left| \frac{1}{\kappa} \{1 - \cos(L\kappa)\} \right| \quad (3)$$

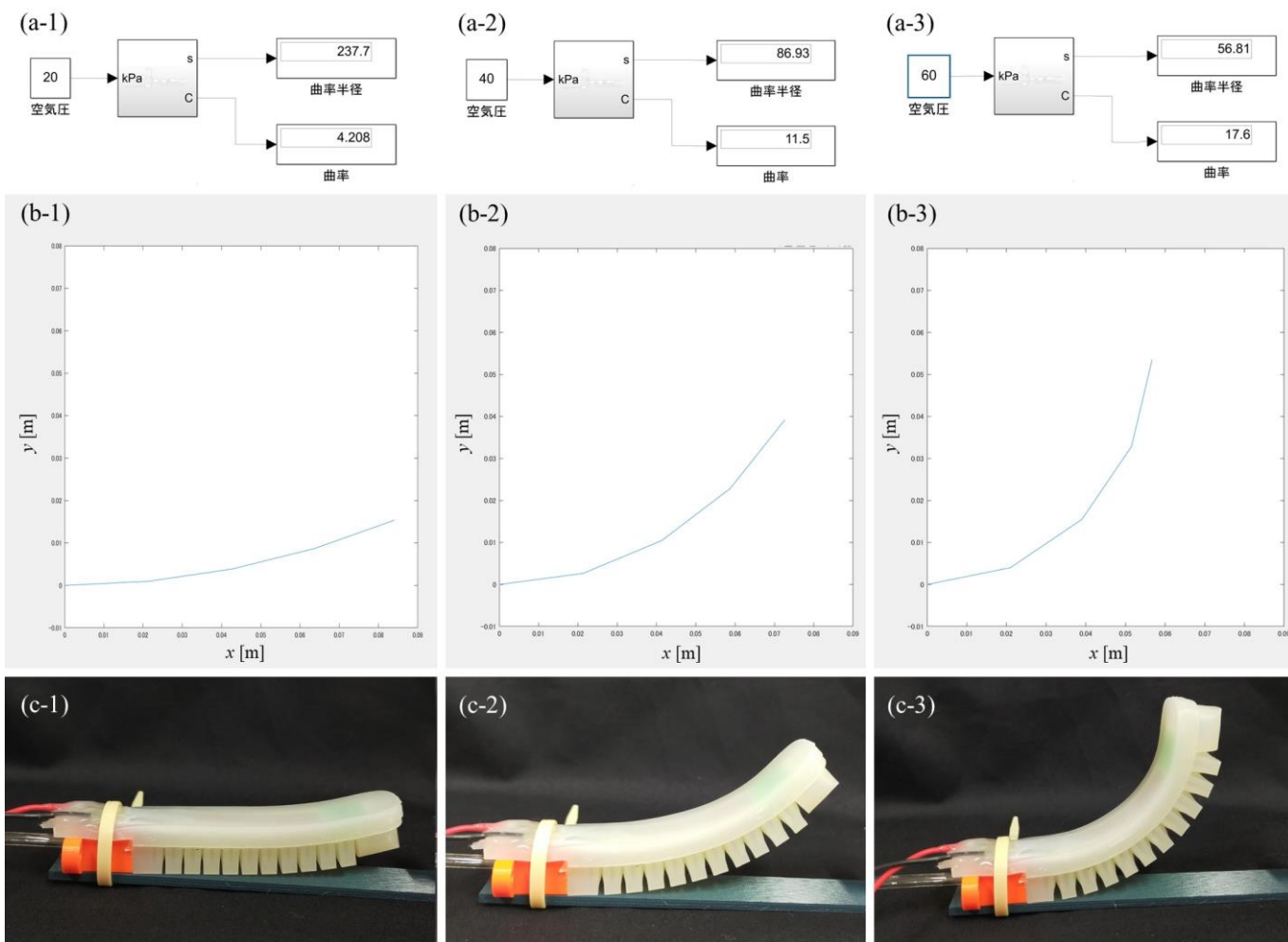


Fig. 9 曲率推定実験, (a-1~3)推定システム, (b-1~3)推定システムで描写された推定変形形状, (c,1~3)実際のソフトグリッパの変形形状, (a~c-1)印加圧力 20kPa での実験結果, (a~c-2)印加圧力 40kPa での実験結果, (a~c-3)印加圧力 60kPa での実験結果

また推定誤差を ΔK とすると, 誤差を含む曲率の推定値 $K + \Delta K$ がある。
 から得られる指先位置の変位 y' は次式より得る。

$$y' = \left| \frac{1}{K + \Delta K} [1 - \cos \{L(K + \Delta K)\}] \right| \quad (4)$$

よって, 曲率の誤差により生じる指先位置の変位の誤差 $\Delta y'$ は

$$\Delta y' = |y - y'| = \left| \frac{\Delta K}{K + \Delta K} \left[\frac{\cos(LK)}{K} - \frac{\cos \{L(K + \Delta K)\}}{K + \Delta K} \right] \right|$$

となる。ここで式(5)に $K=1.04, 19.8$ (空気圧 10kPa, 70kPa 印加し時の曲率)と全体の誤差の最大値, 最小値, 平均値を代入し, 誤差の範囲を調べる。その結果を Table 4 に示す。Table 4 より, 曲率が小さいほうが, 指先位置の変位へ及ぼす影響が大きいことがわかった。また, 誤差の最大値の結果から, 指先位置の推定には最大で 8mm 程度の誤差が発生することがわかった。推定精度を向上させるためには, より多くの曲率に対してセンサ電圧を計測し, フィッティングの精度を高める必要

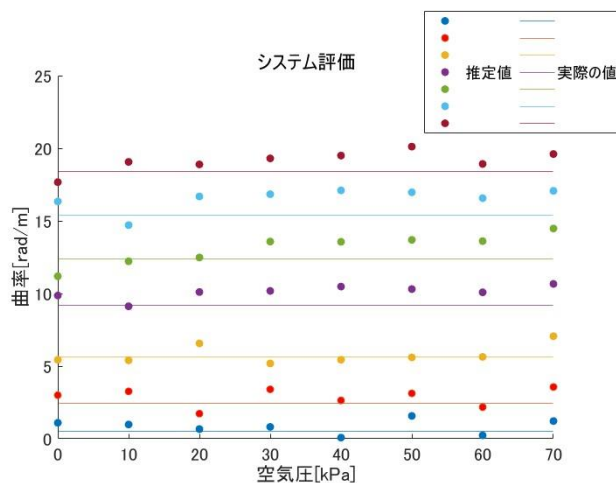


Fig. 10: システムの評価

4. 結言

本稿では、IPMC センサ内蔵グリッパの曲率を推定した。初めに、IPMC センサ内蔵グリッパの曲率や電圧、印加する空気圧の関係を調べた。それにより得られた、実験値から電圧と曲率のモデル式を導出し、そのモデル式を解くことで、曲率を推定した。また、その関係式をMATLAB/Simulinkにより、プログラミングすることで曲率推定システムを作成した。

今後は、曲率推定システムを用いた、物体把持の成否判別や、把持物体の大きさ推定に関して調べる。

Table 2: ガイドの曲率

ガイド	1	2	3	4	5	6	7
曲率	0.52	2.43	5.66	9.21	12.37	15.39	18.40

Table 3: 誤差の評価

誤差 [rad/m] \ 空気圧 [kPa]	0	10	20	30	40	50	60	70
最大誤差	1.18	0.83	1.29	1.45	1.71	1.71	1.24	2.11
最小誤差	0.22	0.09	0.11	0.29	0.21	0.06	0.02	0.69
誤差絶対値の平均値	0.7	0.45	0.65	0.89	0.88	1.07	0.62	1.38
分散 [(rad/m) ²]	0.09	0.08	0.19	0.16	0.34	0.32	0.23	1.2

Table 4: 指先位置の変位への影響

	曲率 [rad/m]	変位[mm] (曲率 1.04)	変位[mm] (曲率 19.8)
誤差の最大値	2.11	7.73	2.54
誤差の最小値	0.022	0.0812	0.0310
誤差の平均値	0.830	3.06	1.10
誤差の分散	0.253		

参考文献

[1] H. Iwamasa & S. Hirai, "Binding of Food Materials with a tension-sensitive elastic thread", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and*

Automation, May 2015, pp. 4298-4303.

[2] M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J.O. Simpson & J.Smith. "Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) As Biomimetic Sensors, Actuators & Artificial Muscles – A Review", *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 6, 1998.

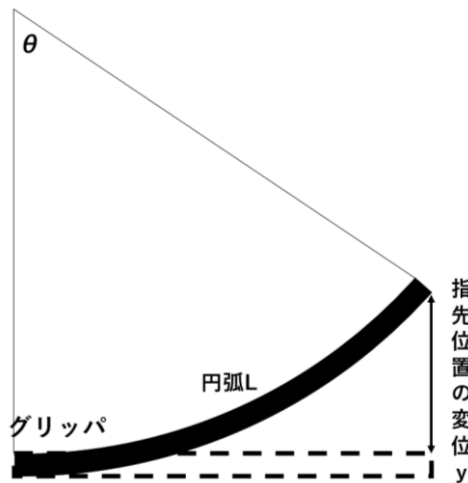


Fig. 11: グリッパ指先位置の変位