均一な力で切断できるはさみによる力センシングの検討

Investigation of force sensing using constant cutting input force scissors

研究代表者　福島工業高等専門学校機械システム工学科　助教　野田幸矢
Satsuaya Noda

To improve manipulability, we assume that force sensing for scissors is significant. In general scissors, a crossing angle of the blade and a moment depends on the cutting position, which causes the cutting input force difference. Though logarithmic spiral scissors enable a constant crossing angle, the moment difference remains. Here, we propose a motion conversion mechanism for logarithmic spiral scissors that enables constant cutting input force. For motion conversion mechanism, this study proposes a curved and a linear slider. Prototype model of the motion conversion mechanism for usual logarithmic spiral scissors (65 mm in blade length) was developed. The experimental results of the cutting kent paper also indicate that the cutting input force does not depend on the cutting position.

要旨

一般的なはさみで力センシングする際，刃どうしの交差する角度や力のモーメントにより切断位置により切断に要する力が異なることが問題となる．対数渦曲線形状の刃のはさみを用いれば，交差する角度が切断位置に依存しないもののモーメントの問題が残る．モーメントの問題を解決するため，本研究でははさみに動作変換機構を用いることを提案する．動作変換機構として曲線スライダと直線スライダを併用する．市販の対数渦はさみ(刃長 65 mm)に適した動作変換機構を開発し，ケント紙切断時切断に要する力が切断速度と切断位置に依存しないことを確認した．さらに，模擬臓器として鶏むね肉を切断し最大9 N程度で切断できることも確かめた．

1．緒言

低侵襲手術では，従来の手術と比べ患者への負担が減るものの術者への負担が大きくなるため，手術支援ロボットが開発されてきた．ただし，手術支援ロボットでは従来の手術と比べ力情報が伝達されないものが多く，臓器に過大な負荷をかけ損傷させる恐れがある．そのため，これまで把持や接触などの力センサ[1, 2]が開発されてきた．こうした力センサの他に，はさみで臓器等を切除したときの力データを収集すればさらなる治療成績向上につながると我々は考えている．

ただし，はさみ鉗子での力センシングにおいて，計測した力が切断位置に依存する問題がある．一般的なはさみでは図 1に示すように，切断位置により回転支点から対象までの距離と刃の交差する角度が異なる．図 2に示すような対数図曲線形状の刃を持つはさみ[3]を用いれば，刃どうしの交差する角度が常に一定になるもののモーメントの問題が未解決である．文献[4]に示すように角度センサと力センサを併用すれば，上述の問題を疑似的に解決できるが分解能の点で切断位置依存の問題が生じる．

本研究では，対数渦曲線形状の刃を持つはさみに対し，変速機構を介すことで切断時入力する力が一定になるはさみを提案する．減速機構を用い切断に要する力を小さくする例[5, 6]も存在するが，本研究では切断に要する力を均一することに着眼している．さらに，提案する変速機構を用いれば切断速度も容易に制御できることも特徴である．

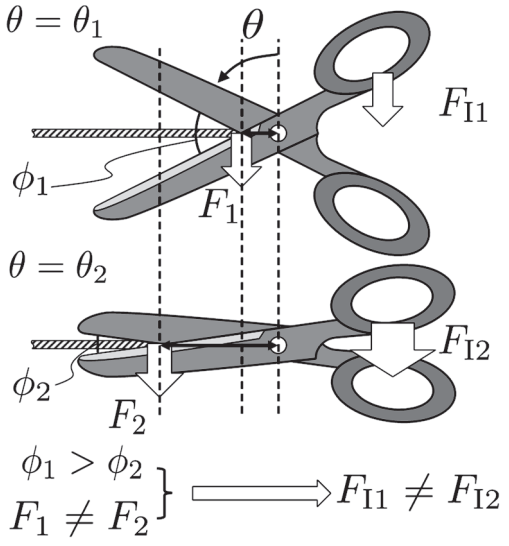


図 1 一般的なはさみにおける切断に要する力と角度の関係

２． 変速機構

２．１．対数渦曲線の性質

対数図曲線とは極座標形式で

$$r_b = Ae^{B\theta} \tag{1}$$

と表されれる．このときx軸と曲線のなす角ϕ_bはθに依存せず

$$\phi_b = \tan\frac{1}{B} \tag{2}$$

の関係を満たす．

２．２．動作変換の設計方針

動作変換機構について図 3 に示すように 4 節リンク機構を用いる方法が簡易である．ただし，後述するように，4 節リンク機構では，切断に要する力を完全に一様にすることが難しい．

そこで，本研究ではカムで動作変換することを検討する．提案する変速機構を図 4 に示す．曲線スライダと直線スライダから構成される．刃先での押し付け力をF_o，スライダに入力する力をF_iとすると，力のモーメントの関係より曲線スライダには

$$\frac{dr_s}{d\theta} = -\frac{F_o}{F_i} r_b(\theta) \tag{3}$$

の関係が成り立つ．よって，$\frac{F_o}{F_i}$を一定にするためには

$$r_s = C_1 e^{B\theta} + C_2 \tag{4}$$

を満たせばよい．両刃が対数渦曲線形状の刃を持つはさみの場合，図 5 に示すように曲線スライダを線対称に配置すればよい．なお，図 4 に示すはさみにおいて入力時に要する力F_iに関しては

$$F_i = -F_o r_b \frac{d\theta}{dr_s} = -\frac{F_o A}{BC_1} \tag{5}$$

となり，図 5 に示すはさみでは

$$F_i = -2F_o r_b \frac{d\theta}{dr_s} = -\frac{2F_o A}{BC_1} \tag{6}$$

となる．

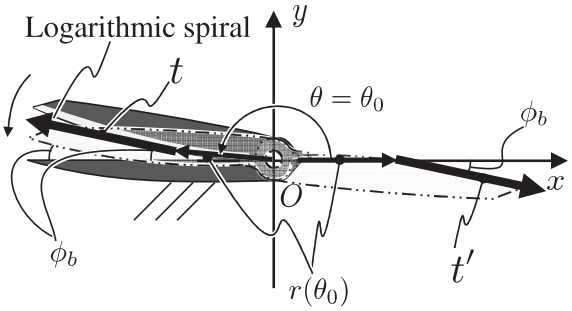


図 2 対数図曲線形状の刃をもつはさみ

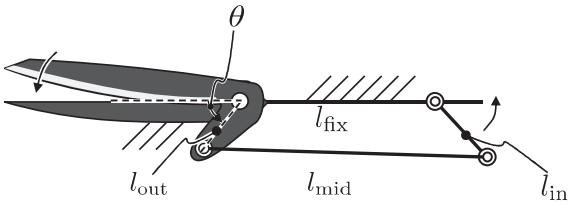


図 3 4 節リンク機構を用いた動作変換機構

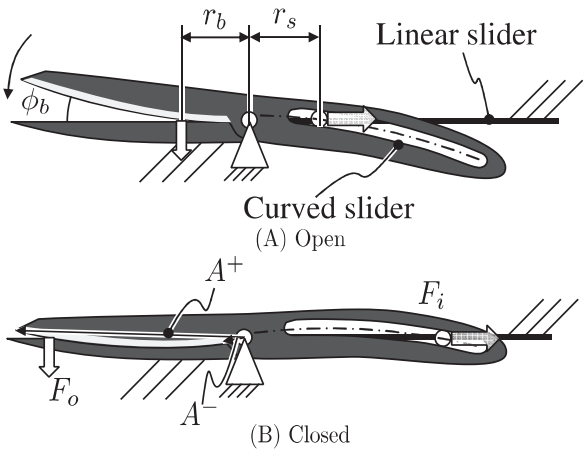


図 4 提案する変速機構

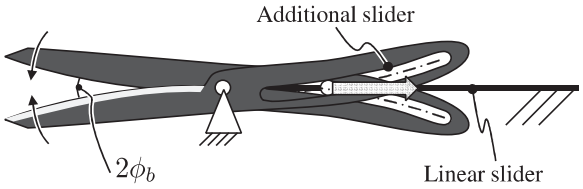


図 5 両刃が対数渦曲線のはさみへの適用

２．３．詳細な設計

式(4)のC_1，C_2に関して任意に設定しても，切断に要する力は切断位置に依存しない．ただし，動作変換機構サイズを調整するため，以下の手順でC_1とC_2を決定する．なお記号に関しては

A^+：刃先先端部分と回転支点までの距離.

A^-：刃先先端部分と回転支点までの距離.

s：直線スライダのストローク長

$s_{\min}$：最小ストローク長．計測装置の分解能などに依存するパラメータである．

$s_{\max}$：最大ストローク長．

r_{smin}：スライドと回転中心間距離の許容最小値．

r_{smax}：スライドと回転中心間距離の許容最大値．

である．sを

$$s = \begin{cases} A^+ - A^- (s_{\min} \leq A^+ - A^- \leq s_{\max}) \\ s_{\min}(A^+ - A^- < s_{\min}) \\ s_{\max}(A^+ - A^- > s_{\max}) \end{cases} \tag{7}$$

と定めるとC_1は

$$C_1 = A^- \frac{s}{A^+ - A^-} \tag{8}$$

となる．C_2に関しては

$$C_2 = \begin{cases} 0 \\ \left(r_{\mathrm{smin}} \leq A^- \frac{s}{A^+ - A^-} \wedge r_{\mathrm{smax}} \geq A^+ \frac{s}{A^+ - A^-}\right) \\ r_{\mathrm{smin}} - A^- \frac{s}{A^+ - A^-} \\ \left(r_{\mathrm{smin}} > A^- \frac{s}{A^+ - A^-}\right) \\ r_{\mathrm{smax}} - A^+ \frac{s}{A^+ - A^-} \\ \left(r_{\mathrm{smax}} < A^+ \frac{s}{A^+ - A^-}\right) \end{cases} \tag{9}$$

となる．なお，切断速度に関しては

$$\dot{r_b} = \frac{A^+ - A^-}{s} \dot{r_s} \tag{10}$$

となる．

２．４．刃と誤差の関係

刃とパラメータのずれがある場合について検討する．式(1)のA，BにそれぞれΔA，ΔBの誤差がある場合，

$$F_i = -F_o r_b(\theta) \frac{d\theta}{dr_s} = -\frac{F_o}{B}\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right)\left(\frac{r_s(\theta)}{A}\right)^{\frac{\Delta B}{B}} \tag{11}$$

の関係がある．ここで，$\Delta B = 0$とすると，

$$F_i = -\frac{F_o}{B}\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right) \tag{12}$$

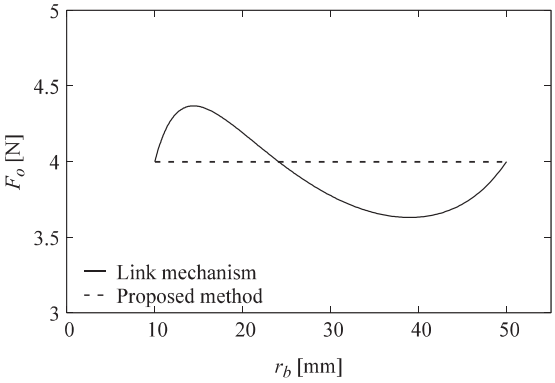
となりΔAが切断位置依存の誤差に影響を与えないことがわかる．

３．　シミュレーションおよび実験

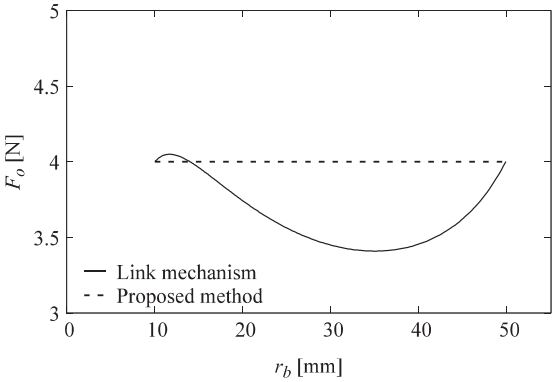
３．１．４節リンク機構の変速機との比較

シミュレーションにおいて４節リンク機構で構成する変速機構と提案手法において，力の誤差を比較する．$A^+ = 50$ ㎜，$A^- = 10$ ㎜と想定し，はさみ先端と根元で誤差が０Nになるような図３中のl_{fix}，l_{mid}を解析的に求めたのち，誤差の最大値を最小化するl_{in}，l_{out}を探索する[2]．

４節リンク機構でF_o誤差を図６に示す．ϕ_B =30, 9.98 deg で最大誤差はそれぞれ9.2%と14.8%であった．このことから，提案手法は４節リンク機構の変速機より簡易かつより小さく誤差を抑制できることがわかる．



(a) $\phi_b = 30°$, $(l_{\mathrm{in}}, l_{\mathrm{out}}) = (9.9, 79.4)$ mm



(b) $\phi_b = 9.98°$, $(l_{\mathrm{in}}, l_{\mathrm{out}}) = (1.0, 145.3)$ mm

図 6 4節リンク機構変速機での誤差.

表 1 曲線スライダのパラメータ

Item		Pattern I	Pattern II	Pattern III
$\lvert\phi_b\rvert$	[°]	30	30	9.98
r_{smin}	[mm]	10	15	10
r_{smax}	[mm]	50	45	50
s	[mm]	40	30	40
C_1	[mm]	10	7.5	10
C_2	[mm]	0	7.5	0

３．２．動作変換機構の確認

提案した機構が動作変換できるか確かめる．動作検証モデルを図 7 に示す． 表 1 に示す三つのパターンで実験する．これらのモデルではいずれも$A^{+}=50$ ㎜，$A^{-}=10$ ㎜，$s_{\min}=25$ ㎜，$s_{\max}=50$ ㎜としている．画像より(r_s，r_b)[㎜]の関係式を算出する．計測結果を図 8 に示す．これらより(r_s，r_b)[㎜]の関係式はPattern Ⅰから順に

$$r_b = 0.923r_s + 0.568 \tag{13}$$

$$r_b = 1.26r_s - 9.00 \tag{14}$$

$$r_b = 0.785r_s - 0.190 \tag{15}$$

となった．Pattern Ⅰ，Ⅱ では比較的設計どおりに動作変換できたものの，Pattern Ⅲ では設計とやや異なる．この原因として，ϕ_bが小さいほど剛性に起因する誤差が生じるためだと考察される．ただし，この誤差はAの誤差となるため，切断位置依存の力の誤差要因にはならない．

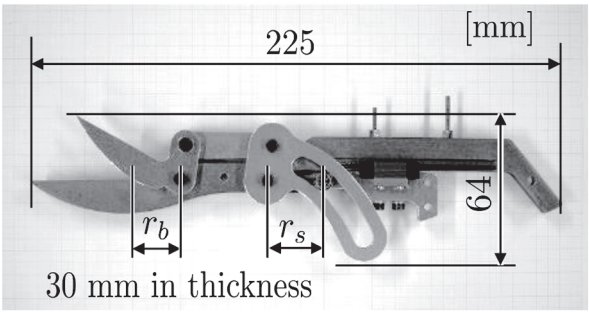
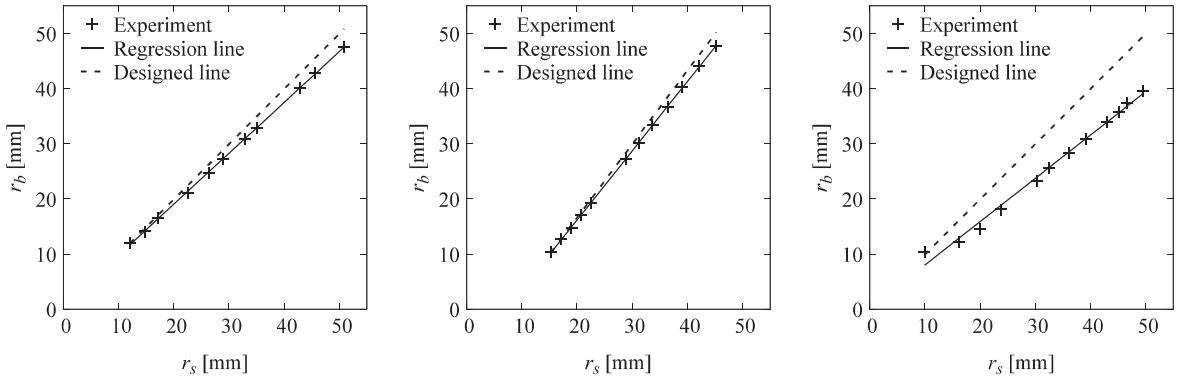


図 7 動作検証モデル



(a) Pattern Ⅰ　(b) Pattern Ⅱ　(c) Pattern Ⅲ

図 8 切断位置とスライド位置の関係

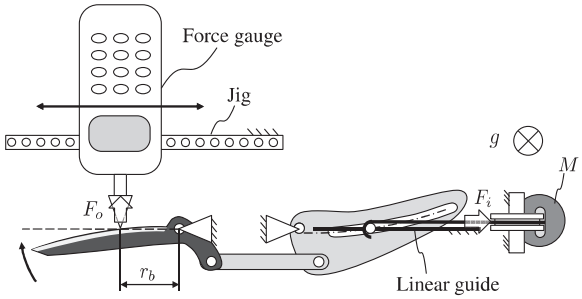


図 9 押し付け力の計測実験模式図

３．３．押し付け力の確認

動作検証モデルで一定の力を入力したときに，押し付け力が均一になるか確かめる．図 9に示すように錘を吊り下げ，そのときの荷重をフォースゲージ(model RZ-20, AIKOH)で計測する．なお，本実験では押し付け力が 4.0 N 程度になるように錘の質量を調整する．

押し付け力の計測結果を図 10 に示す．比較として押し付け力の設計値を図 10(1)に，一般的な対数渦はさみで押し付け力の平均値が 4.0 N となるようにしたときのシミュレーション値を図 10(2)にそれぞれ示す．Pattern Ⅰ-Ⅲ におけるF_oの平均値はそれぞれ 2.92，2.94，3.06 N となり設計値(図 10(1))より低くなった．F_o–r_sの傾きに着目すると，Pattern Ⅰ–Ⅲ でそれぞれ1.64×10^{-2}，1.06×10^{-2}，7.31×10^{-3} N/㎜ となった．これらの傾きは，図 10(2)のシミュレーション値での傾き-1.17×10^{-1}，-1.17×10^{-1}，-1.32×10^{-1} N/㎜ と比べ小さいことがわかる．したがって，提案手法の動作変換機構で押し付け力を均一にできると言える．

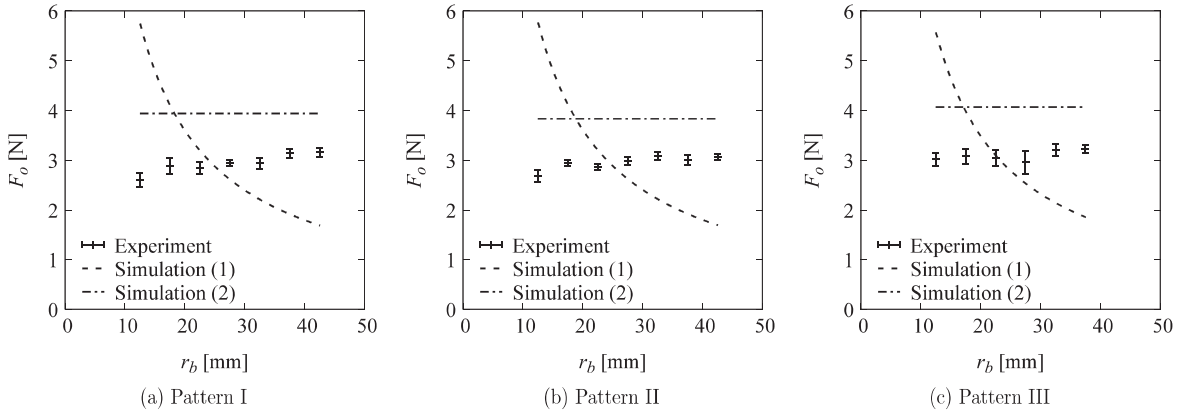


図 10 押し付け力の計測結果．比較のため，押し付け力の設計値を(1)に，一般的な対数渦はさみで押し付け力の平均値が 4.0 N になるようにしたときのシミュレーション値を(2)に示している．

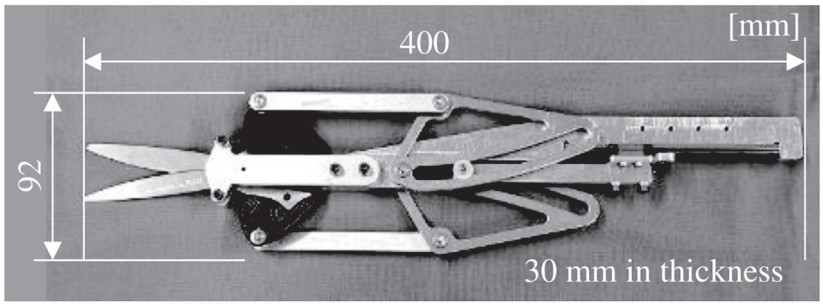


図 11 開発した切断に要する力が均一になるはさみ

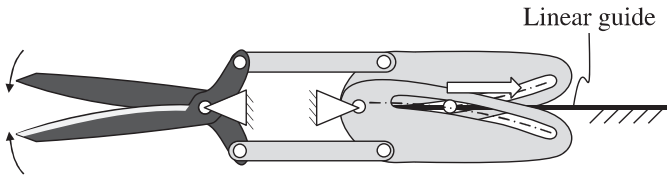


図 12 開発したはさみの機構模式図

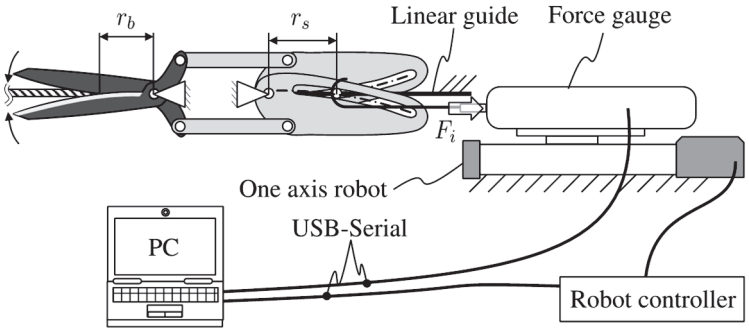


図 13 切断力計測実験の実験構成

３．４．ケント紙切断に要する力の計測

開発したはさみを図 11 に，設計パラメータをに表 2，模式図をに，実験構成を図 13 にそれぞれ示す．一般的なはさみでは図 14 に示すような反りを有するものの，試作することが難しいため，本研究では市販のはさみ(SC-175S, PLUS 社[7])の刃を用いる．刃の形状に関してスキャナで(Canon LiDE220)で形状を取得し，Levenberg-Marquard 法で B を推定すると $B = 5.68\,(2|\phi_b| = 19.96°)$ となった．また，

動作変換機構での関係式をケント紙切断距離から

計算すると

$$r_b = 0.711 r_s + 0.223 \qquad (15)$$

となった．フォースゲージ(model　RZ-10，AIKOH)を単軸ロボット(RW106-C1-C3-100，MISUMI)に取り付けている．単軸ロボットを駆動させはさみを閉じる際にかかる力をフォースゲージで 5 回計測する．文献 [8] を参考に，はさみでの切断速度が 49.5 mm/s となるよう単軸ロボットを 72 mm/s で駆動させる．フォースゲージのデータは USB シリアル通信により PC に転送される．

ケント紙切断時の切断に要する力を図 15 に，切断位置と切断に要する力の関係を図 16 にそれぞれ示す．なお，図 16 における切断に要する力は，図 15 のケント紙切断に要する力から無切断時に要する力の差にあたる．なお，シミュレーションデータに関しては以下のように設定する．

- 通常の対数渦はさみで切断を想定し，回転支点から 80 mm 地点のところに力点を設定する(図 16(1))．
- 切断に要する力の平均値が実験値と合致するよう柄を伸ばし，回転支点から 164 mm のところに力点を設定する(図 16(2))．

図 16 の実験値において，$17.0 \leq r_b \leq 64.9$ mm でのF_iの平均値は1.05 N，r_bに対するF_iの変化は-4.87×10^{-3} N/mm であった．一方，図 16 (1)(2)のシミュレーションにおいてr_bに対するF_iの変化はぞれぞれ，5.23×10^{-2}，2.56×10^{-2} N/mm であった．実験におけるr_bに対するF_iの変化は，シミュレーションの値より十分小さい．したがって，ケント紙の場合，提案手法により切断時入力する力に関して切断位置による影響を抑制できると言える．

参考として切断速度が 7.0 mm/s のとき，切断に要する力を計測した結果を図 17 に示す．切断速度が 7.0–49.5 mm/s の場合，図 15 の時系列データとほぼ同じ程度の力を要した．したがって，切断速度の影響はほとんどないと考察される．

表 2 開発したはさみの各パラメータ値

Item		Value
$\lvert\phi_b\rvert$	[°]	9.98
r_{smin}	[mm]	10
r_{smax}	[mm]	100
s	[mm]	81
C_1	[mm]	10
C_2	[mm]	0

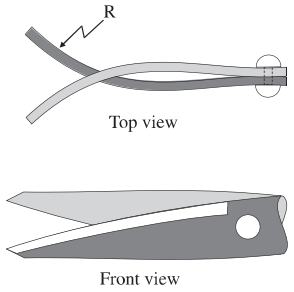


図 14 はさみの反り

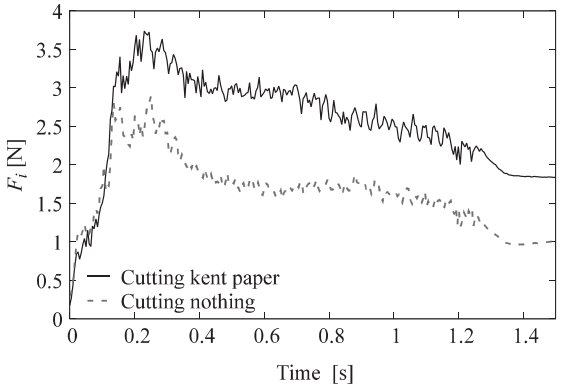


図 15 ケント紙切断時における切断に要する力．(切断速度が 49.5 mm/s で切断したときの時系列データ)

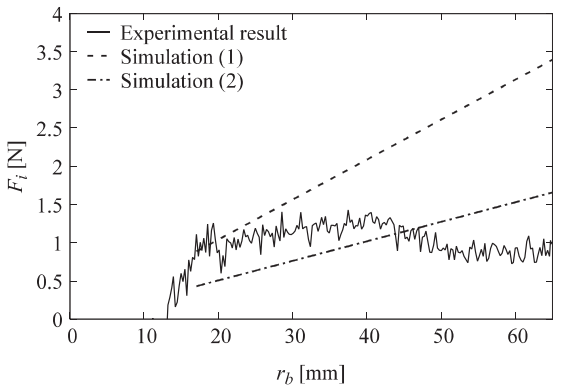


図 16 ケント紙切断時における切断に要する力と切断位置の関係．比較として(1)刃の回転支点から 80 mm のところに力点があるはさみと(2)刃の回転支点から 160 mm のところに力点があるはさみでの切断に要する力のシミュレーション例を示している．

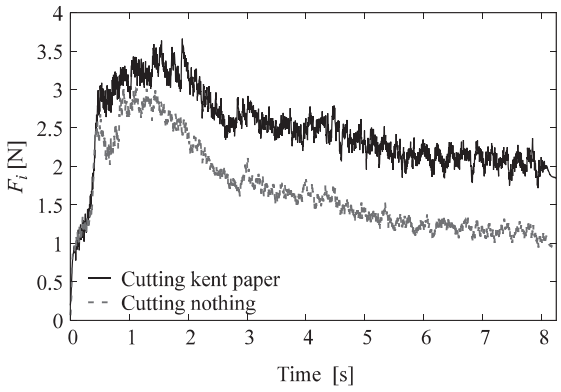


図 17 ケント紙切断時における切断に要する力．（切断速度が 7.0 mm/s で切断したときの時系列データ）

3．5．模擬臓器切断に要する力の計測

模擬臓器切断時に切断に要する力がどのようになるか確認する．本研究では模擬臓器として鶏むね肉を使用し，厚さが 10 ㎜程度になるように調整する．切断速度に関しては 9.9 ㎜/s と 49.5 ㎜/s でそれぞれ 5 回行う．

図 18 と図 19 に実験結果を示す．切断速度が 9.9 ㎜/s のとき切断に要する力の最大値は 6 N 程度であり，49.5 ㎜/s のとき最大値は 9 N 程度であった．各実験で力の測定値がばらついた原因として試料厚さの不均一さが考えられる．試料の厚さのばらつきに関して，3 ㎜程度ばらつきがあった．

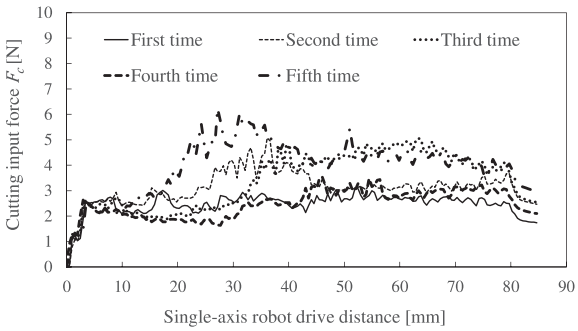


図 18 模擬臓器の切断に要する力の計測結果(切断速度 9.9 mm/s)

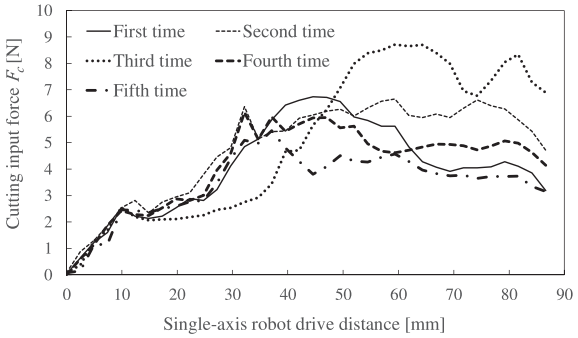


図 19 模擬臓器の切断に要する力の計測結果(切断速度 49.5 mm/s)

4． 結言

本研究では対数渦はさみに対し，変速機構を介することで，切断時入力する力が均一になるはさみを提案した．変速機構として，本研究では直線スライダと曲線スライダを用いた．試作した動作変換機構において，設計どおり動作変換できることと押し付け力が一定になることを確認した．開発したはさみにおいてケント紙を切断し，切断に要する力が切断位置に依存しないことを確かめた．さらに，鶏むね肉を模擬臓器としたとき，計測した力にばらつきがあるものの最大 9 N 要することがわかった．

発表論文

[1] 野田幸矢，吉田索，″切断に要する力が均一になるはさみの開発―切断位置による力の誤差を修正するための曲線スライダ設計手法―″，ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021 in Osaka，1P2-H02，2021 年 6 月

[2] 野田幸矢，吉田幸輝，吉田索，藁谷真輝，″力計測のための切断時入力する力を均一化するはさみの開発（基本原理の確認）″，日本機械学会論文集，Vol. 88，No. 905，21―00281，2022 年 1 月

[3] 吉田幸輝，野田幸矢，″切断に要する力が均一になるはさみの

開発―模擬臓器切断時における切断力の評価―″，ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022 in Sapporo，2022 年 6 月(発表予定)

参考文献

（1） Gafford, J. B., Kesner, S. B., Degirmenci, A., Wood, R. J., Howe, R. D. and Walsh, C. J., A monolithic approach to fabricating low-cost, millimeter-scale multi-axis force sensors for minimally-invasive surgery, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.1419―1425..

（2） Takaki, T., Omasa, Y., Ishii, I., Kawahara, T. and Okajima, M., Force visualization mechanism using a moir¥'{e} fringe applied to endoscopic surgical instruments, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2010), pp.3648―3653.

（3） 吉田宏志，対数渦ばさみ，実用新案開昭 63-68972 (1988).

（4） Greenish, S., Hayward, V., Chial V., Okamura, A. and Steffen, T., Measurement, analysis, and display of haptic signals during surgical cutting, Presence: Teleoperators Virtual Environments, Vol.11, No.6 (2002), pp.626―651.

（5） Meissner, F., Shears and scissors., US Patent 985,048 (1911).

（6） Huang, C. C., Pair of scissors comprising a gear transmission mechanism to work a movable jaw thereof, US Patent 6,938,346 (2005).

（7） PLUS 社，PLUS 社ホームページ，available from 〈https://bungu.plus.co.jp/product/cut/fcurve/fcc/〉，(参照日 2021 年 8 月 25 日).

（8） 庭野史成，菊地喜貴，妻木勇一，多様な道具を扱えるロボットハンドを用いた紙切断作業，日本ロボット学会誌，Vol.33，No.7 (2015)，pp.555―561.