

医療支援用多関節マニピュレータの開発

Development of Articulated Manipulator for Medical Support

○田村 翔*, 畑中 亘輝*, 湯川 俊浩

○Sho Tamura*, Koki Hatanaka*, Toshihiro. Yukawa

*岩手大学大学院総合科学研究科理工学専攻機械・航空宇宙コース

Graduate school of Engineering, Iwate University

キーワード：運動学(Kinematics), 多関節マニピュレータ(Articulated Manipulator),
低侵襲手術(Minimally Invasive surgery)

連絡先：〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 大学院 理工学専攻
機械・航空宇宙コース 田村翔

TEL:019-621-6403, FAX:019-621-6403, E-mail: g0324128@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 患者の QOL (Quality Of Life) の観点から, 低侵襲手術の適用が増えつつあり, 国内では年間十パーセント程度の増加率の上昇傾向にある. 腹腔鏡などの内視鏡を用いて手術する箇所を確認しながら行う低侵襲手術は, 視界確保の目的で切開する必要がなく, 切開範囲を最小限に抑えることが可能である. これにより, 患者の肉体的, 精神的負担の軽減, 術後の早期社会復帰等, 様々な利点がある. このような背景を受けて, 手術用ロボットや手術器具の利便化に関する研究が盛んに行われるようになり¹⁾, 最近では, 先端の器具の細径化とマニピュレータの多自由度化の研究が多くすすめられている²⁾³⁾. 代表的な手術支援ロボットである da Vinci^R は Intuitive Surgical 社によって開発され, 海外において数多くの臨床に用いられている. 今後は手術器具をより小さく, 十分な自

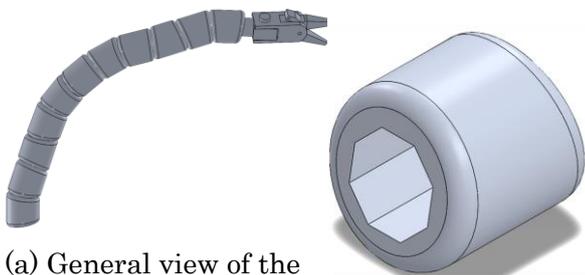
由度を確保するための開発が重要となる.

本論文では低侵襲手術における病変の除去や結さつ等をおこなう術具である鉗子をエンドエフェクタとする多関節マニピュレータの開発について述べる⁴⁾⁵⁾. 現状, 低侵襲手術における侵襲の領域は, 手術ロボット da Vinci^R に搭載されている処置具で 8~10 ミリメートル径程度であり, 主に腹腔鏡手術に用いられている. 本論文では脳深部手術を想定しており, 脳細胞を破壊しないように腹腔鏡手術と比べて可動範囲を狭くする必要があるので, 6~9 ミリメートル径の作業ができる器具を開発する⁶⁾. 多関節アームの直径 9 [mm] の作業範囲については, 実際の脳外科手術の範囲を参考に, 脳深部までにいたる範囲が直径約 25 [mm], 最大深さ 100~130 [mm] の円筒形状と設定する⁷⁾. なお, 手術器具は煮沸消毒や滅菌処理が必要になるため, 機構が単純であり, 動力

伝達に電氣的要素を除いて設計する。

2. 多関節マニピュレータの設計

関節ユニット単体の外形は、円柱を正八角形で削り貫いた円筒状部材を、側面からみて台形状に切断した斜切円筒⁸⁾⁻¹⁰⁾である。円筒の外径は 9.0 [mm]，円筒を切断する角度は 10.0 [°]，斜切円筒の垂直断面中心の長さは 8.4 [mm]，正八角形に内接する円の直径は 5.0 [mm]である。ユニットを組み合わせてマニピュレータを構成する。各関節ユニットを個々に回転させることで、マニピュレー



(a) General view of the manipulator consist of the joints

(b) 3D view



(c) Side view



(d) Front view



(c)' Side view



(d)' Front view

Fig.1 The developed manipulator and its joint unit

タ全体の形状を任意に変形させることを考える。

図 1 は(a)マニピュレータの全体図，(b)関節ユニット単体の外観，(c)側面，(d)正面を示す。

3. 多関節マニピュレータの運動学

3.1 関節ユニット単体の運動学

二つの関節ユニットの斜切円筒の切断平面は

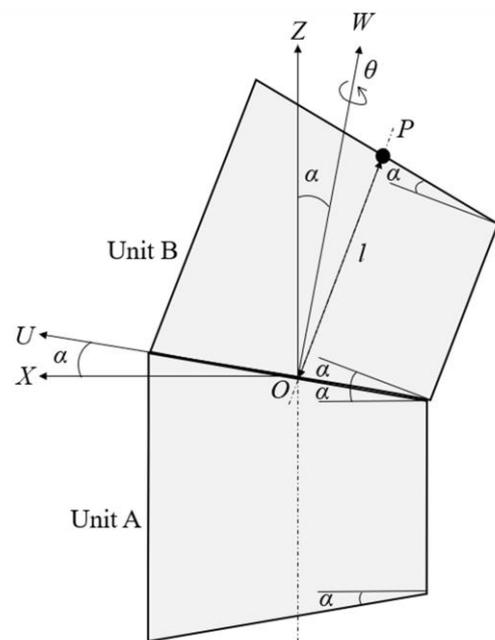
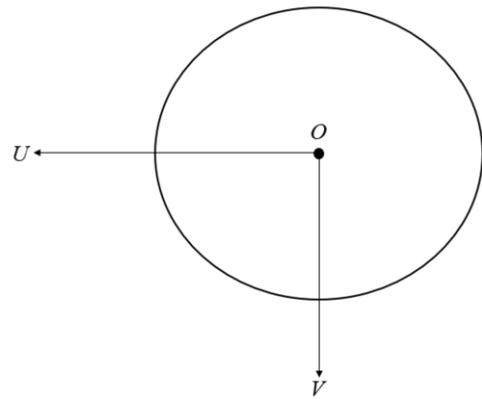


Fig. 2 The cascade connection of both joint components

楕円面になる. その楕円の中心が一致するように関節ユニットどうしを連結させる. このとき, ベース側のユニットをユニット A, エンドエフェクタ側のユニットをユニット B とする. 二つのユニットの中心軸が同一直線上に存在する状態をユニット A からみたユニット B のねじれ $\theta=0$ [°] とする. ユニット A を固定し, ユニット B との接続平面が重なった面の中心を通り接続面に垂直な直線まわりに θ [°] だけ回転させたときのユニット B の先端の楕円の中心座標 $P(X, Y, Z)$ を求める. ユニットの切断角度を α [°], ユニットの中心軸長を l [mm] とする.

ユニット A の接続面中心を原点 O として, ユニット A の中心軸の延長線上に Z 軸をとり, Z 軸に垂直でユニット A の最長母線と直交する直線上に X 軸, Z 軸と X 軸に対して右手系となるような方向の直線上に Y 軸を取る座標系 $\Sigma_A(X-Y-Z)$ を定義する. さらに, 原点 O を通る接続面の法線の上に W 軸, W 軸に垂直でユニット A の最長母線と交差する直線上に U 軸, W 軸と U 軸に対して右手系となるような方向の直線上に V 軸を取る座標系 $\Sigma_B(U-V-W)$ を定義する (図 2). (表記を簡略化して $\sin\theta$ を $S\theta$, $\cos\theta$ を $C\theta$, $\sin\alpha$ を $S\alpha$, $\cos\alpha$ を $C\alpha$ とおく)

座標系 Σ_A におけるユニット B の先端の座標 P (α, θ) は,

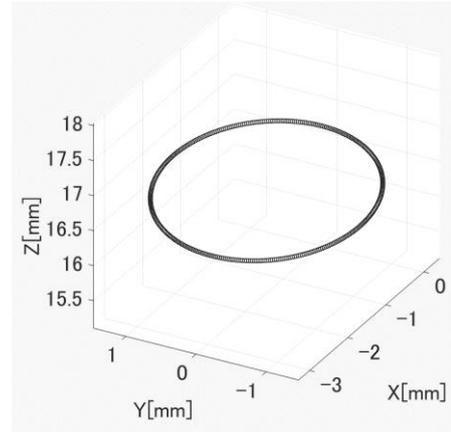
$$\mathbf{P}(\alpha, \theta) = {}^A\mathbf{R}_B \mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} \frac{l}{2} S 2\alpha (C\theta - 1) \\ l S\alpha S\theta \\ l (S^2\alpha C\theta + C^2\alpha) \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる. ただし,

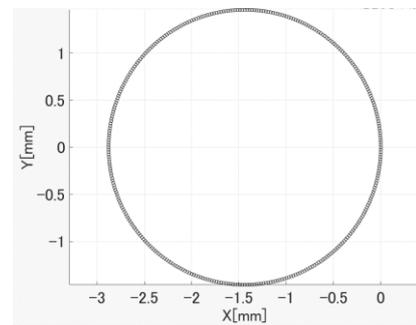
$$\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l S\alpha C\theta \\ l S\alpha S\theta \\ l C\alpha \end{bmatrix}$$

$${}^A\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} C\alpha & 0 & -S\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ S\alpha & 0 & C\alpha \end{bmatrix}$$

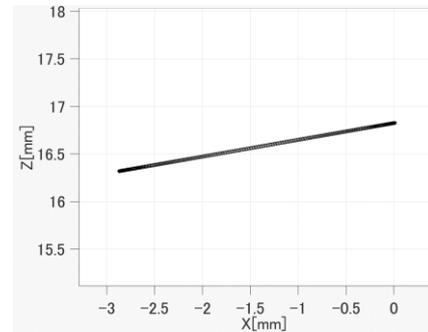
である. 式(1)をもとに, 座標系 Σ_A におけるユニット B の先端の座標 P の可動範囲を示したのが図 3 である. (a)は 3 次元的に見た視点, (b)は上



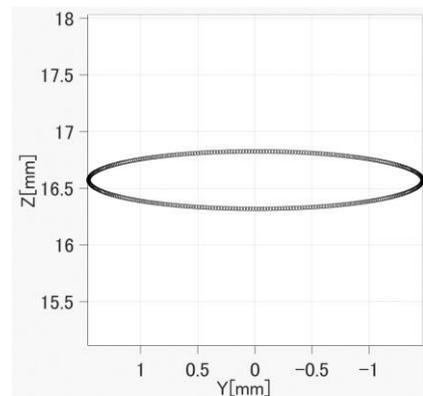
(a) 3D view



(b) X-Y place



(c) X-Z place



(c) Y-Z place

Fig. 3 Outlines of the cutting plane when two joint units are combined

面, (c)は側面, (d)は正面を表す.

3.2 マニピュレータ全体の運動学

二つの関節ユニットを連結させた場合の運動学を基に, 多関節マニピュレータとして複数の関節ユニット ($n = 3, 4, \dots$) を連結させた場合の順運動学を求める. 多関節マニピュレータのベースから i 番目 ($i = 2, 3, \dots, n-1$) のユニットの先端 P_i を原点として, そのユニットの中心軸の延長線上に Z_i 軸をとり, Z_i 軸に垂直でそのユニットの中心軸と直交する直線上に X_i 軸をとり, Z_i 軸と X_i 軸に対して右手系となるような方向の直線上に Y_i 軸をとる座標系 Σ_i を各ユニットに定義する. このとき, ベース座標系 Σ_0 を基準とした多関節マニピュレータ全体の先端の座標 P_i は,

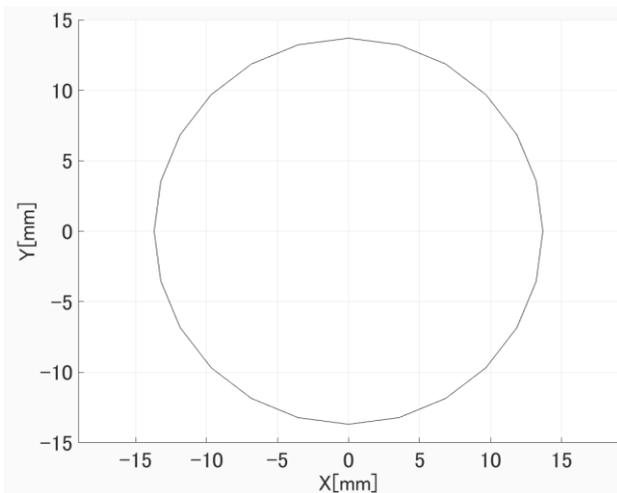
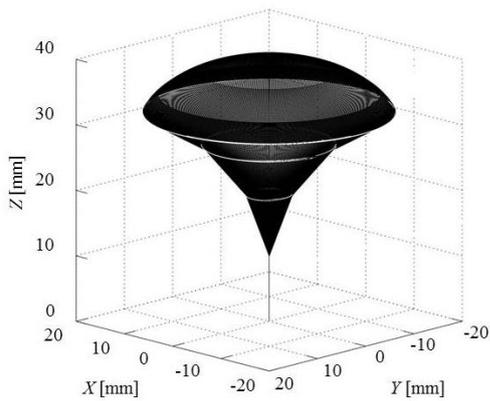
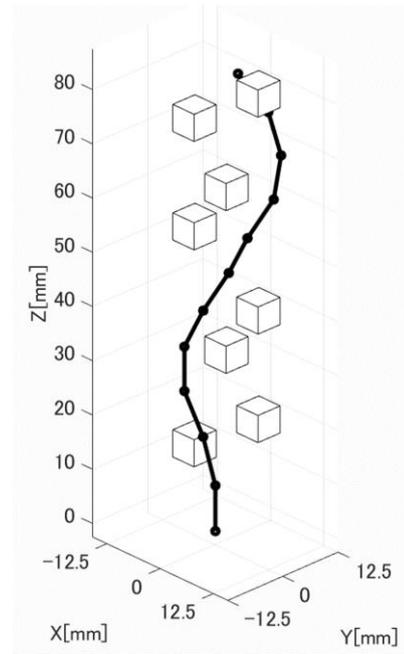
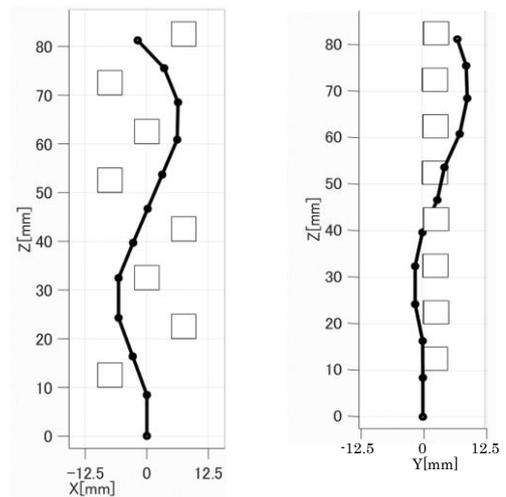


Fig. 4 The movable range of the manipulator ($n = 4$)

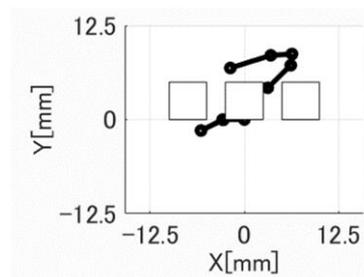


(a) 3D view



(b) X-Z place

(c) Y-Z place



(d) X-Z place

Fig. 5 Avoiding obstacles

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 \dots {}^{i-2}\mathbf{T}_{i-1} \begin{bmatrix} {}^{i-1}\mathbf{P}_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。ただし、

$${}^{i-1}\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

であり、各要素は

$$R_{11} = -S^2\alpha - C^2\alpha C\theta_{i-1}$$

$$R_{12} = C\alpha S\theta_{i-1}$$

$$R_{13} = -S\alpha C\alpha(1 - C\theta_{i-1})$$

$$R_{21} = -C\alpha S\theta_{i-1}$$

$$R_{22} = -C\theta_{i-1}$$

$$R_{23} = S\alpha C\theta_{i-1}$$

$$R_{31} = S\alpha C\alpha(1 - C\theta_{i-1})$$

$$R_{32} = S\alpha C\theta_{i-1}$$

$$R_{33} = C^2\alpha + S^2\alpha C\theta_{i-1}$$

であり、 ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$ と ${}^{i-1}\mathbf{P}_i$ は

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}\mathbf{R}_i & {}^{i-1}\mathbf{P}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} X_{i-1} \\ Y_{i-1} \\ Z_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l}{2} S 2\alpha (C\theta_{i-1} - 1) \\ l S\alpha S\theta_{i-1} \\ l(S^2\alpha C\theta_{i-1} + C^2\alpha) \end{bmatrix}$$

となる。ただし ${}^0\mathbf{P}_1$, ${}^0\mathbf{R}_1$, ${}^0\mathbf{T}_1$ は

$${}^0\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix}$$

$${}^0\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} C\theta_0 & -S\theta_0 & 0 \\ S\theta_0 & C\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_1 & {}^0\mathbf{P}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である¹²⁾。

式(2)を基に $n=4$ の場合のマニピュレータ全体の可動範囲を図4に示す。Octaveで描いたマニピュレータを構成する関節ユニットの数が4個

の最大可動範囲の端は、予め設定した手術作業領域直径である 25 [mm]を超えていることが確認できる。つぎに、式(2)を基に作業領域内で多関節マニピュレータが任意の障害物(実際には脳内の健康な組織)を回避している様子を図5に示す。健康な組織を傷つけてしまわないように指定した作業領域内で多関節マニピュレータを制御できれば病変の位置まで到達し、切除や焼灼を行うことができることが期待される。

4. 結言

低侵襲手術に用いる多関節鉗子マニピュレータを設計した。つぎに、順運動学を用いてマニピュレータ先端の座標を導出し、最大可動範囲および作業領域内での動きをシミュレーションした。

参考文献

- 1) Zhi Li, et al, "Maximizing Dexterous Workspace and Optimal Port Placement of a Multi-Arm Surgical Robot", 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3394-3399
- 2) Zaneta Koszowska, et al, "Independently Actuated Soft Magnetic Manipulators for Bimanual Operations in Confined Anatomical Cavities", Adv. Intell. Syst, 2024, 6, 2300062
- 3) Xiaojie Ai, et al, "Dexterity Comparison and Analysis of Multi-Contact-Aided Continuum Manipulators", 2024 IEEE Robotics and Automation Letters, pp. 5679-5686
- 4) 櫻田陽一, 湯川俊浩, "高精度低侵襲手術用鉗子マニピュレータの多自由度構造システム化", システム・情報部門学術講演会 2015 (2015), 36-37
- 5) Seung-Ju Lee, et al, "Design and control of tele-matched surgery robot", Proc. Mechatronics 24 (2014), 395-406
- 6) P. B. McBeth, et al "Robotics in neurosurgery", *Am J Surg*, 18 (4), pp. 68S-75S, 2014
- 7) 大久保拓郎ら, "深部狭所での操作を対象とした脳神経外科手術多自由度ロボット鉗子の開発", Proc. of the 2014 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics, May 25-29, 2014, 3A1-B01
- 8) 柴野康介ら, "斜交関節機構を用いた移動機構に関する研究", No. 12-3 Proceeding of the 2012 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hamamatsu, Japan, May 27-29, 2012
- 9) 柴野康介ら, "フィールドロボットへの適応を考慮した多自由度斜交関節に関する研究", No.15-2 Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kyoto, Japan, May 17-19
- 10) 柴野康介ら, "斜交関節を用いた多自由度関節機構に関する研究", No. 13-2 Proceeding of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Tsukuba, Japan, May 22-25, 2013
- 11) 柴野康介ら, "多自由度斜交関節のフィールドロボットへの適応", No. 14-2 Proceeding of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Toyama, Japan, May 25-29, 2014
- 12) 社団法人日本ロボット学会, 新版ロボット工学ハンドブック, コロナ社 (2005), 28-31, 240-246