

パラレルメカニズムを利用した油圧駆動型管内作業ロボット

金沢大学 柴田 壮佑, 関 啓明, 神谷 好承, 疋津 正利

Hydraulic Driven Sewage Robot with Multi Degree of Freedom Cutting Tool.

Kanazawa University Sousuke SHIBATA, Hiroaki SEKI, Yoshitsugu KAMIYA, Masatoshi HIKIZU

Necessity of the repairing deteriorated sewage pipes is increasing in current Japan, however, the conventional way of digging and changing their pipes takes much time and money. If a remote-controlled robot works in a sewage pipe for repairing, the construction expense and term can be reduced greatly. Robots in practical use have some problems. They have little degree of freedom at its tool part for complex task and they can't be propelled by their wheels because of heavy hydraulic cable. In this study, we propose and develop a new robot working in the sewage pipe. It equips a cutting tool supported by parallel link mechanism with four degree of freedom and it has a built-in hydraulic drive system. In this report, mechanism of the tool part is mainly discussed for robot design.

1. 序論

現在,日本では下水管の老朽化に伴う補修の必要性が増加している.下水管を掘り起こして交換する工事は大掛かりとなるが,管内に遠隔操縦型のロボットを入れて補修作業を行えば,大幅に工事費や工期が少なくて済む.実用化されている下水管ロボットもいくつかあるが,手先の自由度が少なく複雑な作業がしにくかったり,油圧駆動型では油圧ケーブルが重く自走できなかつたりする等の問題点がある.

そこで,本研究では油圧駆動源をロボット本体に内蔵し,油圧シリンダを用いたパラレルメカニズムで駆動される多自由度な手先を持つ下水管内作業ロボットを開発する.本報告では,まず基本的な手先機構の検討や設計を行った.

2.パラレルメカニズムを利用した油圧駆動型管内作業ロボットの提案

管という狭い空間の中で手先工具の位置姿勢を様々に変えられ,十分な加工力を出せるようにするため Fig.1 のような平面パラレルリンク機構の手先部を提案する.2組の2自由度リンクで手先工具を支える形になる.それらの4関節のうち,3関節を3本のシリンダで駆動すると手先の位置姿勢を変化できる.手先部は旋回によって管の全周方向に向くようにした.手先工具の自由度は3自由度+旋回の合計4自由度となる.下水管内は劣悪な環境なので,シリンダの伸縮や,手先工具の回転には油圧駆動を用いる.手先部のシリンダは油圧駆動源のシリンダと1対1で接続し,工具を回転させる油圧モータは油圧ポンプと閉ループ接続して駆動する.

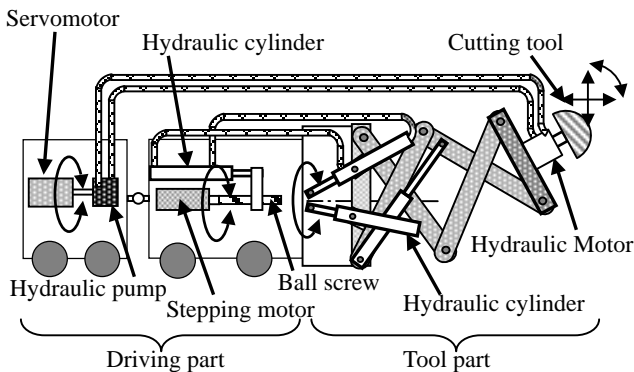


Fig.1 Concept of hydraulic driven sewage robot

3. 手先機構の運動学と力学

3つのシリンダ長さを $l=(l_1, l_2, l_3)$ とし,手先工具の位置姿勢を $P=(x, y, \theta)$ とする.まず P から l を求める逆運動学を計算した. P から2組の2自由度リンクの先端を求め,3角形の関係よりリンクの各関節角 $\theta_1 \sim \theta_4$ を出し,シリンダ長さを導いた.ヤコビ行列 J については,順運動学より逆運動学のほうが計算しやすいので,逆行列 J^{-1} を求めた.シリンダ長さ,手先工具の位置姿勢の微小変化量を Δl , ΔP とすると,

$$\Delta l = J^{-1} \Delta P = (J_{\theta} J_l)^{-1} \Delta P \quad (1)$$

となる.ここで, J_{θ} は関節角から手先位置姿勢へのヤコビ行列, J_l はシリンダ長さから関節角へのヤコビ行列である.シリンダの力 $f=(f_1, f_2, f_3)$ と,手先工具に加わる力 $F=(F_1, F_2, F_3)$ の関係は

$$J^T F = f \quad (2)$$

となる.この機構には特異姿勢が存在する.次の値 w が0に近づくとき特異姿勢に近づき,手先の剛性が弱くなるくことが分かる.

$$w = \frac{1}{|\det J|} \quad (3)$$

4.シリンダの配置と手先工具の可動範囲の評価

手先機構のシリンダ配置を含めたリンクパラメータを決定するには,手先工具 P の可動範囲と剛性を評価する.必要とされる可動範囲は作業内容(手先姿勢)に依存する.主に $\theta = 45 \sim 135 [^{\circ}]$ では本管と支管を貫通させる側面での切削作業を行い, $\theta = 0 [^{\circ}]$ ではロボット進行方向の異物の除去作業を行う.あらかじめ設定したリンクパラメータと,各手先姿勢において必要とされる可動範囲を Fig.2 に示す.また,各手先姿勢でのリンクの状態を Fig.3 に示す.それぞれの手先姿勢で,必要とされる可動範囲を満たすようにシリンダ配置を決定しなければならない.

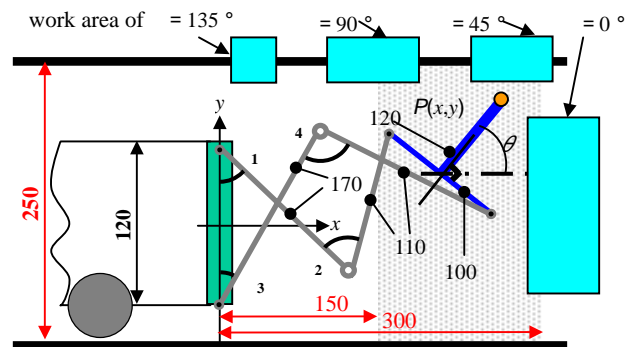


Fig.2 Link parameter of sewage robot and necessary work area of cutting tool

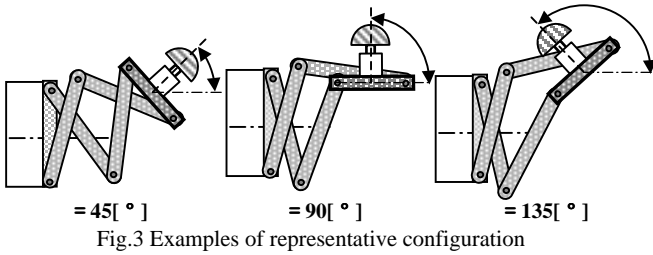


Fig.3 Examples of representative configuration

また、可動範囲を評価する際、特に特異姿勢に陥らずに作業できるかに注意する。特異姿勢は Fig.4 に示すように、手先工具根元の 2 関節と駆動しないリンクが一直線になった場合と、シリンダ 2 本で駆動される 2 自由度リンクが一直線に伸びた場合の 2 つが挙げられる。

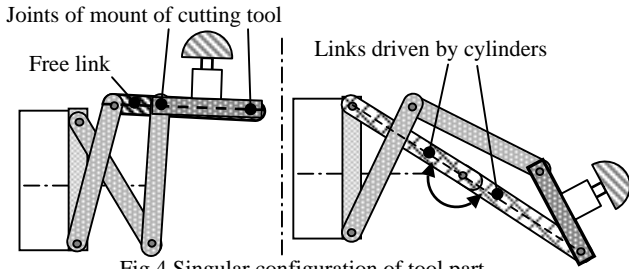


Fig.4 Singular configuration of tool part

シリンダの配置は以下の 3 ステップを経て決定する。

まず、リンクの関節角から手先位置姿勢へのヤコビ行列 J_θ を評価して、駆動すべき関節角を決定する。次に、必要とされる可動範囲を満たすようにリンクの関節角の範囲を調整する。最後に、管に干渉せずにコンパクトに配置できる具体的なシリンダの取り付け方を決定する。

①リンクの関節角から手先位置姿勢へのヤコビ行列 J_θ の評価

特異姿勢に陥ることなく出来るだけ高い剛性でロボットが作業するには、リンクの各関節角 ($\theta_1 \sim \theta_4$) のうち、どの関節角を駆動すべきかを選ぶ。本機構で手先位置姿勢 (x, y) を変化させるには 4 つの関節角 ($\theta_1 \sim \theta_4$) のうち、3 つの角度 ($\theta_a, \theta_b, \theta_c$) を駆動すればよいので組み合わせは 4 パターンある。各関節角の可動範囲 ($-15 < \theta_1 < 120, 0 < \theta_2 < 180$) を仮定し、様々な手先位置姿勢におけるヤコビ行列 J_θ を計算する。そして、ヤコビ行列の各要素の最大値を評価する。各要素の最大値が小さいほど剛性が高い。また、この値を色分けして表示したものを Fig.5 に示す ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を選び、手先姿勢 $(x, y) = (0, 0)$ の場合)。4 パターンにおいて手先姿勢を変化してこのシミュレーションを行った結果、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を駆動する場合が必要とされる可動範囲で比較的高い剛性であることが分かった。

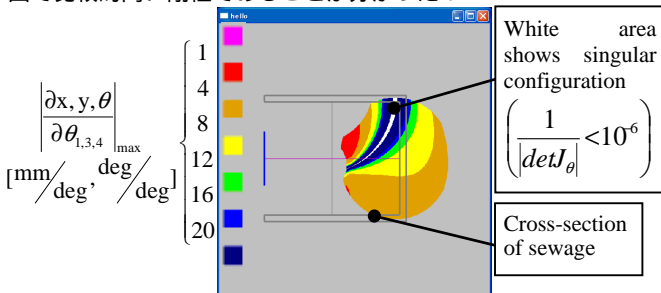


Fig.5 Work area of cutting tool driven by $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ in case of $\theta_4 = 0^\circ$

リンクの関節角の範囲の調整

各手先姿勢において必要とされる可動範囲を過不足なく満たすように、ステップで仮定した関節角の可動範囲を減らしていく。無駄な可動範囲を減らすことで、機構の剛性が向上できる。調整後、 $-15 < \theta_1 < 80, 0 < \theta_2 < 80, 15 < \theta_3 < 165$ になった。

具体的なシリンダの取り付け方の決定

ある関節の可動範囲に対して二等分線と垂直にシリンダを配置すれば、効率よく出力をリンクに伝えることができる。しかし、シリンダが管に干渉したり、無駄なスペースを必要としたりすることがある。そこで、Fig.6 のように、シリンダの出力の伝達が変わらないように、リンクからある角度 θ_o オフセットした位置にシリンダを θ_o 傾けて取り付ける。また、スペースによってはシリンダを逆向きに取り付けてもよい。3 つのステップを経て最終的に決定したシリンダ配置を Fig.7 に、その時、シリンダ長さから手先位置姿勢へのヤコビ行列 J を計算し、その各要素の最大値の分布を 4 つの手先姿勢について Fig.8 に示す。

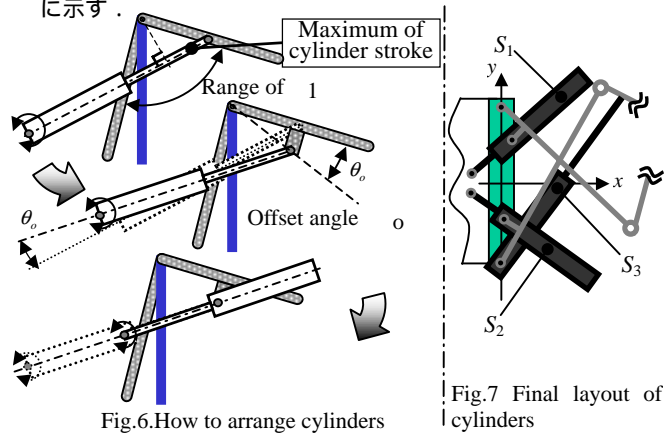


Fig.6. How to arrange cylinders

Fig.7 Final layout of cylinders

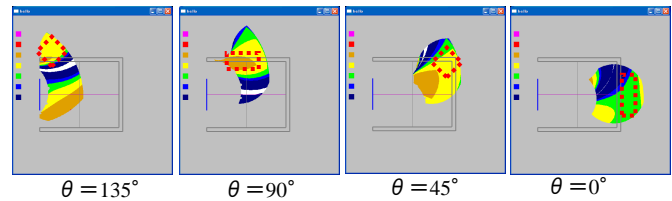


Fig.8 Final work area of cutting tool

5. 管内作業ロボットの設計

直径 250[mm] の下水管を対象とし、マンホールから入れられるように全長 1[m] 以内のロボットを設計した。Solidworks で描いた 3 次元モデルを Fig.9 に示す。手先部の剛性を保つようにシリンダとリンクを交互に配置した。工具が受ける反力 50[N] とすると、手先部のシリンダには最大 530[N] が生じる。シリンダ径を 25[mm] とすると、油圧は 1.1[MPa] になる。なお、手先部のシリンダの最大速度が 5[mm/s] となるように、最大静止トルク 0.3[Nm] のステッピングモータを用いて減速比 1:4 の歯車とリード 2[mm] のボールネジを介して油圧駆動源のシリンダを動かすようにした。モータの必要トルクは 0.12[Nm] となった。

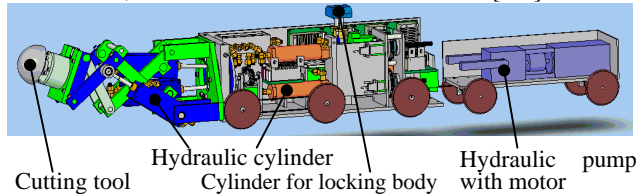


Fig.9 3D model of sewage robot

6. 結論

下水管内での作業を効率化するため、パラレルメカニズムを利用した油圧駆動型管内作業ロボットを提案し設計した。今後は試作と動作テストを行い、更なる改良を加える。

謝辞

本研究の遂行にあたり多大なご支援をいただきました株式会社北菱に深く感謝いたします。