

## スキルアシストのための3自由度劣駆動型ロボットアームの開発

### Development of 3DOF underactuated type robot arm for skills assist

○ 水上卓也（金沢大大学院） 小塚裕明（金沢大） 立矢 宏（金沢大）

山際博之（金沢大） 塩谷圭太（金沢大）

Takuya MIZUKAMI, Graduate School of KanazawaUniversity  
Hiroaki KOZUKA, KanazawaUniversity  
Hiroshi TACHIYA, KanazawaUniversity  
Hiroyuki YAMAGIWA, Graduate School of KanazawaUniversity  
Keita SHIOYA, KanazawaUniversity

**Abstract:** This study proposes a skill-assist arm that can support the precise positioning of an operator. The arm has a passive joint that the operator can rotate by own will, so that the speed and force of the skill-assist arm can be adjusted by the operator. Simultaneously, the joints equipped with actuators are moved to achieve the specified positioning according to the passive joint motion. Previous study fabricated a 2-DOF skill-assist arm for drawing figures on various planes. This study proposes a 3-DOF skill-assist arm that assists an operator to achieve precise positioning in 3-dimensional space. The 3-DOF skill-assist arm consists of a weight compensation mechanism and enable the operator to draw figure in space smoothly.

**Key Words:** Skill-Assist, Passive Joint, Human-Robot Cooperative Task

#### 1. 緒言

ロボットは正確な位置決めは比較的容易に行えるが環境に応じて力や速度を加減するには複雑な制御が必要となる。一方、ヒトは環境を判断して、力や速度の加減を行うことは比較的得意であるが、様々な軌跡に沿って手先などを正確に位置決めすることは必ずしも得意でない。そこで、本研究では、ある動作において、ヒトが速度や力を調整し、ロボットがヒトの位置決めを補助して、正確な動作を実現するスキルアシストアームを提案する。

先に、2次元での動作補助を対象に、関節の一部が受動関節であるスキルアシストアームを提案した。同アームの受動関節は、操作者が出力点を動かすことで自由に回転する。よって、ヒトが出力点の瞬間的な速度や力を加減できる。また、このときの受動関節の動きに応じて、出力点が指定された軌跡上を移動するように、アクチュエータを配置した駆動関節を制御する。実際に同アームを製作して実験を行い、出力点に設置したペンによって正確な図形が容易に描けること、また、滑りやすい波状面に対してもヒトが面の凹凸に応じてペンの動きを調整することで容易に描画が行えることを確認した。

本研究では、さらに、同アームを拡張して空間での動作補助を可能とする。そのための自重補償機構を利用した機構、3次元動作補助のための制御方法を提案して、その妥当性を示す。将来的には、特に脳疾患などの治療後に、片麻痺などの後遺症が残った患者に対し、自身の意志で四肢を動かそうとする動作の補助を提案するアームを用いて実現し、最終的にはニューロリハビリテーションへの応用を図ることを目標としている。

#### 2. 空間スキルアシストアーム

##### 2.1 機構形式

提案するスキルアシストアームには図1に示す3自由度

機構を用いる。入力関節をベース側から第1~3関節とし、いずれの関節にもアクチュエータを設置する。第2関節が駆動するリンクは平行クランクを構成しており、出力節は常にXY平面と平行に保たれる。平行クランクの上側リンクは長さを延長し、後述の自重補償機構を設置する。

##### 2.2 特異姿勢

受動関節を有するスキルアシストアームは一般的な3自由度シリアルロボットアームの特異姿勢に加え、アシストが正常に行えなくなる特異姿勢が存在する。その例として図2に示す場合が考えられる。図2左側は受動関節を変位させることなく駆動関節のみで理想軌跡に沿った方向へ移動できる姿勢である。このとき、受動関節がわずかでも変位すると駆動関節のみでは出力点を理想軌跡上へ移動できなくなったり、大きな変位が必要になったりする。図2右側は受動関節による出力点変位方向が理想軌跡と垂直になる姿勢である。この時、理想軌跡に沿った方向（目標方向）の操作では受動関節が変位せず、スキルアシストアームはヒトの位置決めを補助を行えない。

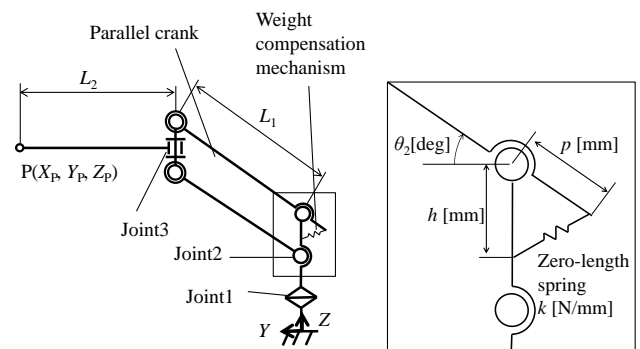


Fig. 1 Mechanism of skill assist arm

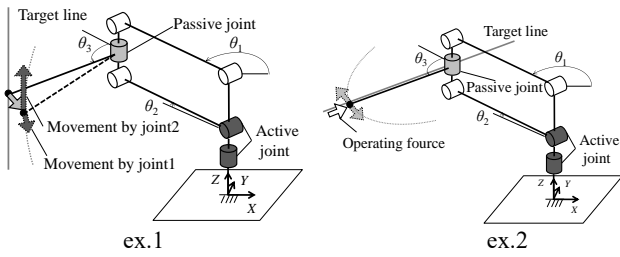


Fig. 2 Singular postures of skill assist arm

上記の特異姿勢は，シリアルアームにおける伸びきった状態などの特定の姿勢でなく，アームの姿勢と目標方向の組み合わせにより生ずる．本研究では後述する受動関節の決定方法により，適切な関節を受動関節とすることで特異姿勢を回避する．

### 2.3 自重補償機構

Z方向の変位を生じる第2関節を受動関節とした場合，ヒトがアームの自重を支えないと受動関節が回転変位してしまう．このようなヒトの意図しない受動関節の変位を回避するため，提案するスキルアシストアームには自重補償機構を備える．

自重補償機構の概略は図1右側に示すとおりであり，自重によって発生する第2関節まわりのモーメントを長さ  $p$  であるリンクの延長部分と，ばねにより補償する．

ここで，第2関節から出力側の可動部による質量は，第3関節に配置するアクチュエータが大部分を占めると考える．すなわち，第2関節まわりに発生する自重によるモーメントは，第3関節のアクチュエータの質量  $m$  とリンクの長さ  $L_1$ ，リンクの角度  $\theta_2$  によって決定される．このとき，図1右側に示す機構のばねを自然長がゼロである理想的なゼロ長ばねとして，回転中心からばね端点までの距離  $p$ ，ばね定数  $k$  の値を，次式を満たすように決定すれば，平行クランク部の角度  $\theta_2$  によらず自重モーメントの補償が行える．

$$khp = mgL_1 \quad (1)$$

なお，実際の装置ではゼロ長ばねの代わりに引張ばね，プーリー，ワイヤなどを用いて製作する．

## 3. 制御方法

### 3.1 受動関節の決定方法

まず，2.2 で述べた特異姿勢を回避するための受動関節決定方法について述べる．

スキルアシストアーム特有の特異姿勢は，理想軌跡に沿った動作（目標動作）に寄与しない関節を受動関節とした場合に生じる．よって，同動作に最も寄与する関節を常に受動関節とすることで特異姿勢を回避できる．

図3に出力点が理想軌跡に沿って微小変位 ( $\dot{P}_E$ ) する状態を示す． $\dot{P}_E$  に含まれる各関節による出力点変位ベクトルを  $\dot{P}_1 \sim \dot{P}_3$  とすると，同ベクトルの理想軌跡上への投影長さは各関節が目標動作にどれだけ寄与しているかを表す指標となる．なお，投影長さは各ベクトルと目標方向の単位ベクトルとの内積で求めることができる．本研究では，それらの比を用いた次式で受動関節を決定する．

$$\frac{\dot{P}_i \cdot p_E}{|\dot{P}_j \cdot p_E|} \geq 1 + \alpha \quad (2)$$

$$\frac{\dot{P}_i \cdot p_E}{|\dot{P}_k \cdot p_E|} \geq 1 + \alpha \quad (3)$$

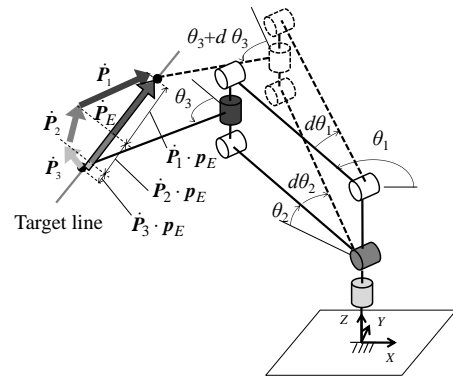


Fig. 3 Selection of passive joint

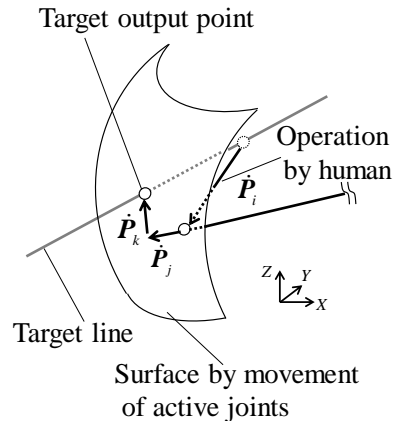


Fig. 4 Target position to assist

式中の添字  $i, j, k$  はそれぞれ関節番号を示す1から3の互いに異なる数字である．式(2)，(3)が成り立つとき，第  $i$  関節を受動関節，第  $j, k$  関節を駆動関節とする．なお，同式右辺の  $\alpha$  は左辺の値が1付近で受動関節が連続して切り替わるのを防ぐために設けた定数であり実験より  $\alpha=0.1$  とした．

### 3.2 駆動関節の制御方法

スキルアシストアームの駆動関節の制御は，ヒトの操作を受けて出力点が理想軌跡から外れず理想軌跡上に保つことを目標とする．制御方法を以下に述べる．まず，前節で述べた方法で受動関節が決定し，次にヒトの操作により受動関節が変位し出力点が  $\dot{P}_i$  変位したとする．駆動関節の微小角変位による出力点変位ベクトル  $\dot{P}_j, \dot{P}_k$  は，図4に示すような駆動関節のみで移動可能な曲面または平面上にあるため，同面と理想軌跡の交点を理想の出力点位置として求める．同位置での各関節角度  $\theta_{id,i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) を逆運動学により求め，同角度を目標として駆動関節を制御する．制御方法にはPI制御を用い， $\theta_{id,i}$  と現在の関節角度との差  $e_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) を次式に代入し，駆動関節へ与える角速度を求める．

$$u_i(t) = K_{P,i} \left( e_i(t) + K_{I,i} \int e_i(\tau) d\tau \right) \quad (4)$$

式中の  $K_{P,i}, K_{I,i}$  はそれぞれ第  $i$  関節の比例・積分ゲインを表す．各ゲインは限界感度法により実験的に決定する．

## 4. 設計・製作

設計・製作したスキルアシストアームを図5に示す．自重補償機構は，平行クランク部の両側に図6に示す引張ば

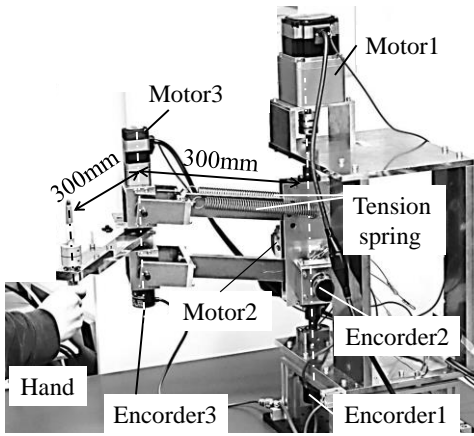


Fig. 5 Prototype

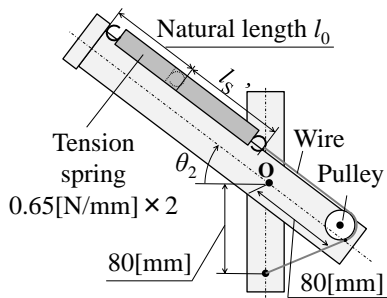


Fig. 6 Weight compensation mechanism

ね・ワイヤ・プーリを用いて設置する。寸法およびばね定数は式(1)のアーム自重  $m$  を  $3.1\text{kg}$  として同図のように決定し、ばね係数が  $1/2$  のばねを並列に  $2$  つ用いた。

第  $1\sim 3$  関節にはステッピングモータとロータリエンコーダを設置する。モータと直結した各関節はモータの励磁を停止することで受動関節に切り替える。なお、リンク長  $L_1$  および  $L_2$  は  $300\text{mm}$  とした。

5. 評価実験

試作機の動作を評価するために、直線アシスト実験を行った。開始点を  $P_0(X_0, Y_0, Z_0) = (-410\text{mm}, 0\text{mm}, 0\text{mm})$ ，直線の長さは  $100\text{mm}$  とした。直線の方法は  $X$  軸の正方向から  $Z$  軸まわりに  $CCW$  方向の角度  $\theta_E$  と  $XY$  平面に対する角度  $\varphi_E$  で指定する。 $\varphi_E$  を  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ， $\theta_E$  を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $30^\circ$  間隔とし、各方向で  $3$  回実験を行った。また、制御周波数および測定周波数は  $100[\text{Hz}]$  とし、出力点位置はロータリエンコーダにより測定した関節角度を用いて順運動学により算出した。

実験結果の例として  $\varphi_E = 30^\circ$  の時の出力点の移動軌跡を図 7，理想軌跡からの位置誤差を図 8 に示す。図 7 より、いずれの方向でも理想軌跡に沿った動作を行えている。また、 $\theta_E$  が  $30\sim 90^\circ$  では第  $1$  関節，それ以外では第  $3$  関節が受動関節となり、特異姿勢を回避した動作が行われている。図 8 より、誤差の最大値，平均値および標準偏差は直線の方法  $\theta_E$  が  $0^\circ$  および

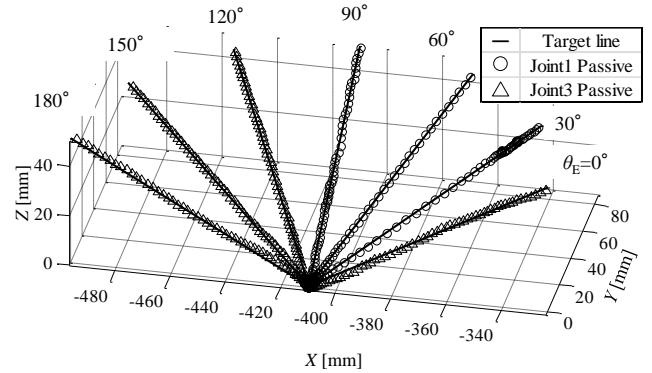


Fig. 7 Results of drawing lines

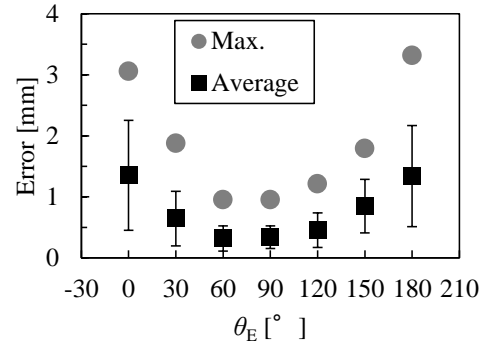


Fig. 8 Positioning errors of drawing

$180^\circ$  で大きく、 $60^\circ$  および  $90^\circ$  では小さくなる傾向が確認できる。

方向による誤差の違いは、アシストに必要な駆動関節変位量が方向によって異なることから生じる。特に  $0^\circ$  や  $180^\circ$  の時に駆動関節となる第  $1$  関節は装置の剛性の影響から他関節よりもゲインが小さいため、アシスト動作が必要量に対して小さくなったと考えられる。しかし、いずれの方向へも誤差は数  $\text{mm}$  程度であり、装置および制御方法の妥当性が確認された。

6. 結言

- (1) ヒトの空間における動作の位置決めを補助する  $3$  自由度空間スキルアシストアームを提案し、製作した。
- (2) スキルアシストアーム特有の特異姿勢の回避方法および駆動関節の制御方法を示した。
- (3) 直線を描く動作のアシスト実験を行い、提案する制御方法によって様々な方向への動作補助が可能であることを確認した。

参考文献

(1) 立矢・小塚・滝澤・吉田，ロボットアームの受動関節を利用した人の位置決め補助に関する研究，日本機械学会論文誌，Vol. 80, No. 820(2014)，  
DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0345