

# 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

著者	立矢 宏, 小塚 裕明, 滝澤 健太, 吉田 博一
雑誌名	日本機械学会論文集 = Transactions of the JSME
巻	80 .
号	820
ページ	TRANS0345
発行年	2014-12-25
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/41380">http://hdl.handle.net/2297/41380</a>

doi: 10.1299/transjsme.2014trans0345

## 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

立矢 宏<sup>\*1</sup>, 小塚 裕明<sup>\*1</sup>, 滝澤 健太<sup>\*2</sup>, 吉田 博一<sup>\*1</sup>

## Assistance for positioning of human by using the passive joint of robot arm

Hiroshi TACHIYA<sup>\*1</sup>, Hiroaki KOZUKA<sup>\*1</sup>, Kenta TAKIZAWA<sup>\*2</sup> and Hirokazu YOSHIDA<sup>\*1</sup><sup>\*1</sup>Kanazawa University, Institute of Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering  
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan<sup>\*2</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University  
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan

Received 22 June 2014

## Abstract

The present study proposes a robot arm that can support precise positioning in operation by a human. The robot arm has passive and actuated joints. The passive joint is not mechanically constrained and can move passively with the motion of the output point of the robot arm. Therefore, a human can move the output point of the robot arm by his will. When a human tries to move the output point along an object path, the displacement of the passive joint is determined passively. Then, if the actuated joint is controlled so that the output point may be on the object path, the human can achieve precise positioning. Namely, using the proposed robot arm, the human can adjust the velocity, acceleration, applied force and so on by his will, while the position is precisely compensated by the actuated joint. This paper describes a mechanical form of such robot arm for drawing of planar figures and shows that the robot arm has specific singularity condition. In order to avoid the singularity condition, the proposed robot arm interchanges the actuated joint and the passive one situationally. The study fabricated the two degrees of freedom robot arm for positioning assistance and described its control method. Furthermore, its availability is confirmed by drawing some figures.

**Key words** : Passive joint, Robot, Manipulator, Positioning

## 1. 緒 言

ロボットの技術を人の動作補助へ利用することが注目されている。特に、ロボットの大きな発生力を利用し、重労働作業支援や身体補助装置などで、人の力の補助を目的とした研究が多くなされている(石井他, 2006)(佐々木他, 2006)(田中他, 2006)。しかし、ロボットは力のみならず正確な位置決めも可能であり、また一方、人は手先などを様々な軌跡に沿って正確に位置決めすることは必ずしも得意でない。そこで、本論文はロボットによる正確な位置決めを利用し、人が軌跡を描く場合における動作を補助して、その位置決め精度を向上させるロボットアームを用いた装置を提案する。

提案する装置は、強制的に人の手先などを変位させるのではなく、人が動作の速さや力を決定し、その動作に応じた受動的な位置決め補助のみを行う。これにより、人は位置決め以外の速さ加減や、力加減の調整に集中でき、例えば、溶接などでは溶接ガンが軌跡から外れることを気にせず、その速度を適切に保つことのみを気に

No.14-00328 [DOI:10.1299/transjsme.2014trans000X]

<sup>\*1</sup> 正員, 金沢大学 理工研究域 機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)<sup>\*2</sup> 学生員, 金沢大学大学院 自然科学研究科

E-mail of corresponding author: tachiya@se.kanazawa-u.ac.jp

[DOI: 10.1299/transjsme.2014xxx000x]

© 2014 The Japan Society of Mechanical Engineers

配れば良い。また、本装置の特徴として、人とロボットが協調して動作することで、人の感覚や判断を利用できることから、特殊なセンサや複雑な制御を用いずに高度な作業が可能となる。例えば、凹凸のある部材の表面を加工するときに、ロボットのみで行う場合、表面の凹凸を認識し、工具を押しつける力加減を調整するため、画像や力に関するセンサと、これらの測定結果を用いた制御が必要となる。しかし、提案する装置を用いれば、人が面の凹凸を認識して工具の位置や押しつけ力を調整し、ロボットが正確な軌跡を補償することで、複雑な計測制御系を用いず精度の高い加工が可能となる。さらに、提案する装置は人が主体的に動かそうとする動作をロボットが補助して正しい軌跡に沿わせるため、作業の教示や、また、リハビリテーションにも応用可能である。

このような受動的な変位を利用した動作補助装置として樋口らは人間共存型補助アーム Pas-Arm(樋口, 2007)(樋口, 2009)を提案している。Pas-Arm では、Passive Robotics(Goswami, et al., 1990)(Goswami and Peshkin, 1999)の概念を取り入れ、装置にアクチュエータを配置せず、CVT と差動機構を用いて、重量物の持ち上げ下ろし作業などの補助を行っている。また、Passive Robotics の概念を取り入れた装置としてこの他に Peshkin らが提案する Cobot (Peshkin and Colgate, 1999)(Peshkin, et al., 2001)がある。Cobot は CVT やブレーキを使用しながら仮想的な壁面を作り出し、この壁面に沿って荷物の運搬などの案内を行う。現在、Cobot は自動車の組み立てラインにおいて部品の組み付けの案内に利用されている。これらはアクチュエータを使用せず確動性の高い位置決め補助が可能である。しかし、CVT などの特殊で複雑な機構を必要とし、さらに、仮想的な壁面を作り出して位置決めを行うため、複雑な曲線軌跡に沿う動作などの補助を行うことは容易ではない。

また、機構ではなく、制御で人とロボットの動作を協調させ、人の動作を補助する方法として、インピーダンス制御を用いる方法が多数検討されている(積際他, 2003)(積際他, 2004)(武居他, 2007)(岡本他, 2013)(井上他, 2013)。しかし、インピーダンス制御は剛性の高い接触をとまう場合にシステムが不安定になりやすいことから(積際他, 2004)、先述のような加工を含む外部環境と接触する作業への応用は容易でなく、また、力の測定が必須であるため、力覚センサを適切に配置する必要があり、制御系の構築も容易でない。

そこで、特殊な機構、高コストなセンサや、複雑な制御を用いず、ロボットと人の協調作業を容易に可能とする一方法として、幾何学的に拘束されておらず外力によって自由に変位する受動関節をロボットアームに掛け、同関節を人がロボットアームの出力点に力を加え操作することにより変位させて、アクチュエータで変位を制御する駆動関節で位置決め補助を行う方法を提案する。同方法では、ある作業に対して、速さや力加減などは人が調整でき、また、駆動関節の制御により正確な位置決めが行える。本論文では、以上の方式による描画作業を対象とした装置を開発し、その有用性を示す。

## 2. 位置決め補助アームの概略

### 2・1 受動関節を利用した位置決め補助方法の概略

本論文では、位置決め補助の対象を文字や、平面図形などとし、ロボットアームの形式は2自由度平面機構とする。簡単のため図1に示す2自由度シリアル機構で位置決め補助動作を説明する。点OおよびAは入力関節であり、それぞれ第1および第2関節と記す。緒言で述べたように、2つの入力関節の一方はアクチュエータで制御し、他方は人の力で受動的に変位させる。アームの出力点Pにはペンなどを装着し、それを人による操作とアクチュエータの制御とを協調して動作させる。以下、このロボットアームを位置決め補助アームと呼ぶ。

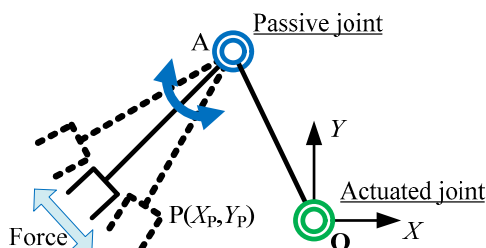


Fig. 1 Outline of a robot arm for assistance of positioning. The robot arm consists of a passive joint that is mechanically free and an actuated joint controlled by an actuator. The passive joint can be driven with external force by human. Then the actuated joint is controlled so that the output point may move on an object position. As a result, accurate positioning is achieved.

ここでは、図1のとおり、第2関節を拘束のない受動関節とする。まず、図2(a)のように人の操作による青矢印のような出力点Pの変位により、受動関節である第2関節が変位する。受動関節の変位 $\theta_2$ に対し、出力点が目標とする軌跡に沿うように駆動関節である第1関節の変位 $\theta_1$ を決定する。図2(b)のように駆動関節の変位が $\theta_1$ となるようアクチュエータを制御し、出力点を目標とする軌跡へ緑矢印のように位置決めする。これらの位置決め制御を短時間でを行うことで、出力点Pを目的とする軌跡に沿って黄色矢印のように移動させることを実現する。

なお、提案する位置決め補助アームは人と協調して動作するが、人の動作停止時にはアームも停止するため、安全性は高いと考えている。しかし、アームの誤動作や、外部環境との接触などにより人が危険を被ることを避けるため、実用時には出力点を把持する手指を過度に拘束せず、人が出力点のツールなどを放した場合にはアームを緊急停止する、アクチュエータの出力に制限を設けるなどの対策が必要と考えている。

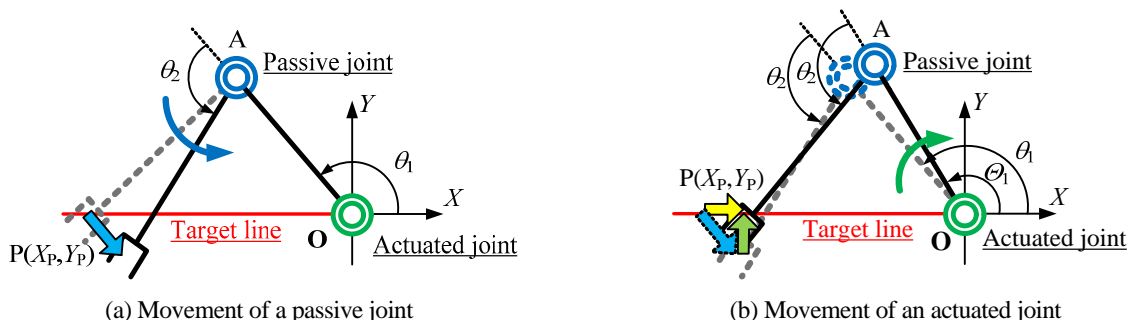


Fig. 2 Outline of a robot arm for assistance of positioning. Joints O and A are passive and actuated joints respectively. The passive joint is driven by human. The actuated joint is actuated so as to move output point P along the target line.

## 2・2 特異姿勢

提案する位置決め補助アームには、動作の補助が困難となる姿勢が存在する。図3(a)にその例を示す。出力点Pの目的動作方向が、同点と駆動関節を配置する点Oを結ぶ線分に直交する場合、駆動関節の回転のみで目的の動作が可能となり受動関節の回転は不要となる。また、同姿勢において受動関節の回転により、青矢印で示すような出力点の変位がわずかでも発生すると、その補正のために駆動関節は緑矢印で示す極端に大きな変位を発生させる必要があり、動作が不安定となる。本論文では以上のような状態を位置決め補助アームの特異姿勢と呼ぶ。

特異姿勢を回避するために、ここでは駆動関節を切り替える。例として、図3(a)の状態となった場合、図3(b)のように第2関節を駆動関節、第1関節を受動関節に切り替える。その結果、目標とする動作に対し、人の操作による受動関節の変位量が、駆動関節の変位量に比べて大きくなり特異姿勢を回避できる。

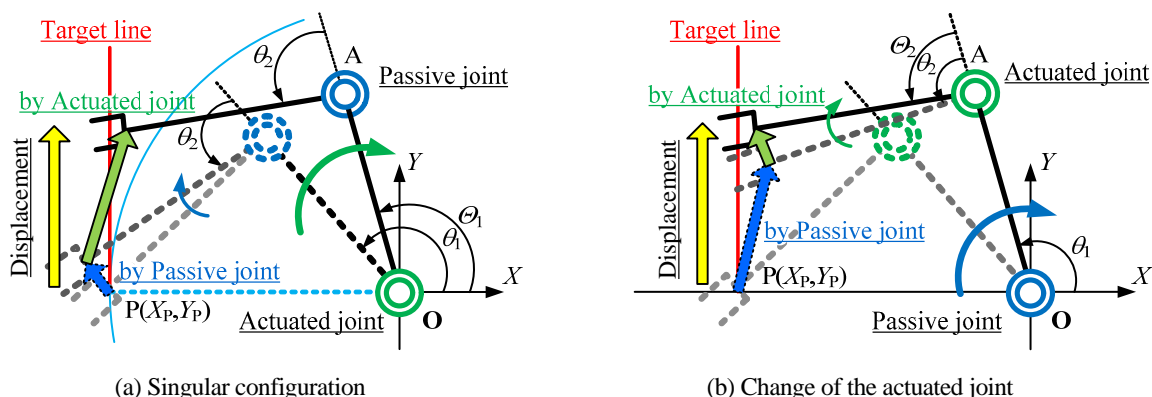


Fig. 3 Avoidance method for the singularity configuration. At certain configurations, operator can hardly move the output point. Then, interchange of the active and passive joint can avoid such singularity condition.

以上により、提案する位置決め補助アームは通常の2自由度ロボットアームと同じく2つのアクチュエータを必要とするため、人と協調動作を行わずに単独での動作も可能である。しかし、複雑な作業を行わせる場合には、それに応じた計測制御系とプログラミングが必要となるのに対し、提案する装置では人と協調することでセンサ

などを用いず高度な作業が可能となり、特に多品種変量生産が求められる小規模生産に有効であると考えている。また、提案する位置決め補助アームは、リハビリテーション装置へ応用することも考えており、人の能動的な動作を補助する機能は、人の運動能力回復のための訓練に有用と期待している。

### 3. 装置の設計・製作

実際の位置決め補助アームには、高剛性化と軽量化のため、図 4(a)に示す 2 自由度平面 7 節平行クランク形機構を用いた。2・2 節で述べたとおりアクチュエータは 2 つとし、いずれもベース上の点 O および A に配置し、アームの姿勢に応じていずれか一方を駆動関節とする。

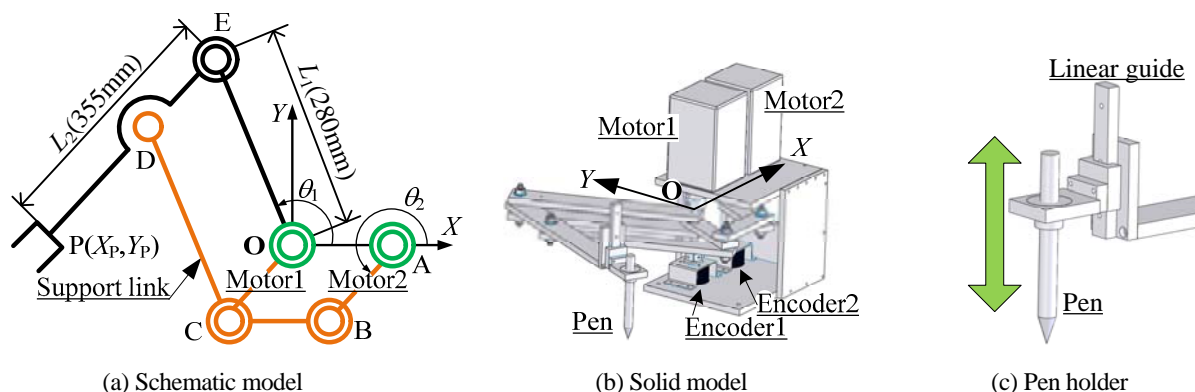


Fig. 4 Prototype of the robot arm for assistance of positioning. The prototype arm consists of a two degrees of freedom planar seven link mechanism. The mechanism arranges the actuators on base and has closed-loop structure so that it possess lightweight and high-rigidity features. The output point has a pen-holder that can move a pen up-and-down freely.

駆動関節の制御は受動関節の変位に応じて行われるため、各関節には図 4(b)に示すようにロータリエンコーダを取り付けて角変位を測定する。モータには、今回は、低速域で高い保持トルクが期待でき、安価で扱いが容易なステッピングモータを用いた。駆動関節を受動関節に切り替える場合にはモータの励磁を停止する。出力点 P には、図 4(c)に示すとおり、上下動が可能なペンホルダーでペンを固定している。なお、ペンの上下動は人が調整する。

### 4. 位置決め補助アームの制御方法

#### 4・1 駆動関節の変位量の決定法

図 5 を用い駆動関節の変位量の決定方法を述べる。まず、出力点の目標軌跡を式(1)のように XY 平面内の関数または連続した離散値で表す。点 O および A に配置する関節をそれぞれ第 1 および第 2 関節とし、それぞれの角度を  $\theta_1$  および  $\theta_2$  とする。出力点 P が目標軌跡上にある状態から人が操作することにより、例えば図 5(a)の青矢印の方向に変位し、受動関節である第 2 関節の変位が  $\theta_2$  から  $-\Delta\theta_2$  だけ変化したとする。このときの理想的な第 1 関節の角度  $\theta_1$  は、第 2 関節の角度が  $(\theta_2 - \Delta\theta_2)$  の状態で出力点 P が目標軌跡上となる値である。同条件を満たす点 P の目標値は図 5(a)の緑の円弧と赤線で示す目標軌跡の交点で表される。緑色の円弧は第 1 関節の回転により点 P がたどる軌跡であり、半径が  $L_1$ 、中心の座標が  $(L_2 \cos\theta_2, L_2 \sin\theta_2)$  である式(2)に示す円の方方程式で表される。したがって、点 P の目標値は  $\theta_2$  を  $(\theta_2 - \Delta\theta_2)$  とした式(1)と式(2)との連立方程式で得られ、同値を満たす第 1 関節の角度  $\theta_1$  を求めて変位量を決定し、制御することで図 5(b)に示すように出力点が目標軌跡上となる。

本論文では位置決め補助アームの制御に PI 制御を用い、駆動関節である第 1 関節の角変位の指令値  $u_1$  を  $\theta_1$  と実際の  $\theta_1$  の差  $e$  より式(4)を用いて求めて与える。  $K_{P,i}$ 、  $K_{I,i}$  はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲインであり、これらの値は限界感度法により実験的に決定する。駆動関節が第 2 関節の場合は式(2)の代わりに、式(3)を用い、同じ手順で第 2 関節の指令値  $u_2$  を決定する。式(3)は、第 2 関節の回転により点 P がたどる軌跡であり、半径が  $L_2$ 、中心の座標が  $(L_1 \cos\theta_1, L_1 \sin\theta_1)$  である円の方方程式である。

$$f(X, Y) = 0 \tag{1}$$

$$(X - L_2 \cos \theta_2)^2 + (Y - L_2 \sin \theta_2)^2 = L_1^2 \tag{2}$$

$$(X - L_1 \cos \theta_1)^2 + (Y - L_1 \sin \theta_1)^2 = L_2^2 \tag{3}$$

$$u_i(t) = K_{p,i}(e(t) + K_{I,i} \int e(\tau) d\tau) \quad (i=1,2) \tag{4}$$

なお、位置決め補助時には0.1msごとに各関節に取り付けたロータリエンコーダから、それぞれの角変位を計測してアームの出力点位置を求め、いずれの関節を駆動関節とするかを決定し、さらに、以上の方法で駆動関節の角変位量を制御する。駆動関節の具体的な決定法については次節に示す。

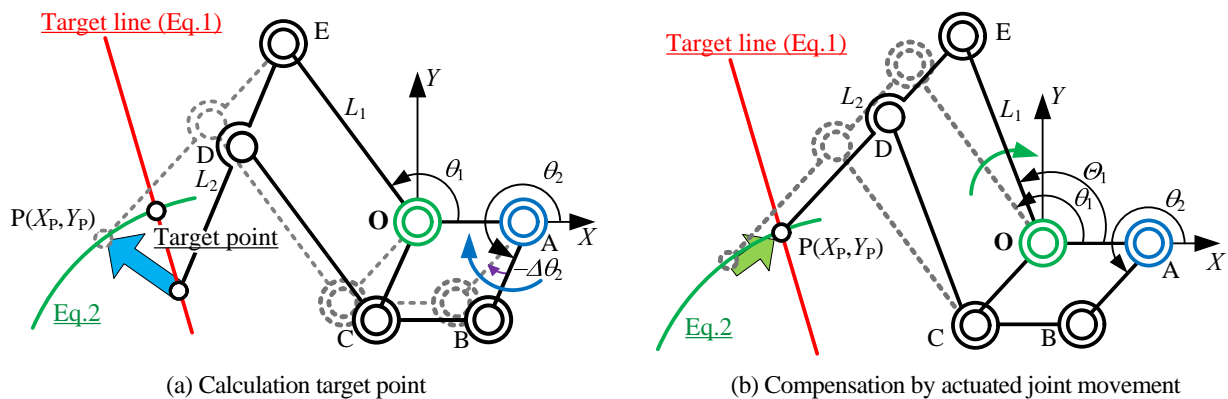


Fig. 5 Determination method for the displacement of the actuated joint. The angular displacement of the actuated joint is determined so that deviation of the output point with respect to the target line is compensated.

#### 4・2 駆動関節の決定方法

位置決め補助アームの特異姿勢では、受動関節の変位に対し駆動関節に発生させるべき変位が極端に大きくなる。そこで、特異姿勢の回避のため、動作時に相対的に大きな変位量が必要となる関節を受動関節、他方を駆動関節とする。各関節の変位量は出力点の動作方向やアームの姿勢により変化する。そこで、アームの各姿勢において出力変位に対する各関節の角変位量を比較して駆動関節を決める。

図6に示すように、アームの出力点速度を  $V$ 、動作方向角度を  $\varphi_E$  とし、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ の瞬間的な変位量を  $d\theta_1$ 、 $d\theta_2$  とすれば、ロボットの出力変位に対する各関節の角変位量はヤコビ行列  $J$  を用い次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} V \cos \varphi_E \\ V \sin \varphi_E \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

ヤコビ行列  $J$  は図6中の記号を用いて次式で表される。

$$J = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_1 & -L_2 \sin \theta_2 \\ L_1 \cos \theta_1 & L_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式(6)より、各関節の角度が  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  である位置決め補助アームの出力点が目的方向角度  $\varphi_E$  へ移動する場合の各関節の瞬間的な角変位量  $d\theta_1$  と  $d\theta_2$  の比は次式で表される。

$$d\theta_1 : d\theta_2 = -L_2 (\sin \theta_2 \cdot \tan \varphi_E + \cos \theta_2) : L_1 (\sin \theta_1 \cdot \tan \varphi_E + \cos \theta_1) \tag{7}$$

以上の関係式を利用して、本論文では次式で駆動関節を決定する。なお、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ および $\varphi_E$ は、ロータリエンコーダによる測定値および目標軌跡の座標値から求める。

$$|d\theta_i / d\theta_j| \geq 1 + \alpha \quad (i=1,2; j=1,2; i \neq j) \quad (8)$$

上式には、駆動関節および受動関節の瞬間的な角変位量を常に $d\theta_i$ および $d\theta_j$ として代入する。駆動関節と受動関節の切り替えは動作中に式(8)が満たされた場合に行う。なお、式(8)中の定数 $\alpha$ を零とすると、同式左辺の値が1付近で出力点が動作する場合、駆動関節の切り替えが短時間に連続して起こることがあり、アームの動作が不安定となる。そこで、 $\alpha$ を正の値として、一旦、駆動関節が切り替わった直後は、関節の微小変位量の大小が変化しても、連続した切り替わりが生じないようにする。本論文では動作試験を行い、 $\alpha$ を0.1とした。

以上では、本論文での2関節を有する位置決め補助アームを対象として駆動関節の決定法を示したが、さらに関節数が増えた場合も、機構の形式にもよるが、ヤコビ行列を用いた相対的な関節角変位量の比較によって、同様に駆動関節を決定可能と考えている。

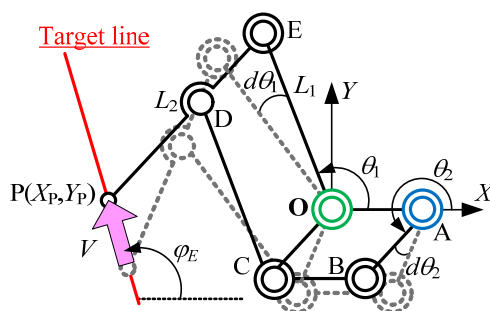


Fig. 6 Determination method for the actuated and passive joints respectively. Those joints are determined so that the displacement of the passive joint operated by human always become larger than that of the actuated joint.

### 5. 平面での基本図形の描画実験

製作した位置決め補助アームの動作を確認するため、平面での直線、円の描画実験を行った。まず、直線の描画結果を示す。直線の長さは200mm、方向を0°から180°まで30°間隔の7方向とした。ペン先の初期位置は、0°から90°方向では図4(a)のXY座標系において(-450mm, -100mm)とし、120°から180°方向では(-250mm, -100mm)とした。なお、式(1)に相当する目標軌跡は直線を表す関数として与えた。描画速度は30mm/s程度を目安として指示したが、実際の速さ加減は操作者にまかせた。測定結果における描画速度の平均値は約38mm/sであった。

比較のため位置決め補助アームを用いず操作者のフリーハンドによって、さらに、位置決め補助アームの2つの関節をいずれも駆動させ、通常のロボットアームとして、それぞれ、以上で述べた直線を描いた。なお、フリーハンドによる描画では、ペンの初期位置と終了位置のみを紙面上に指示した。

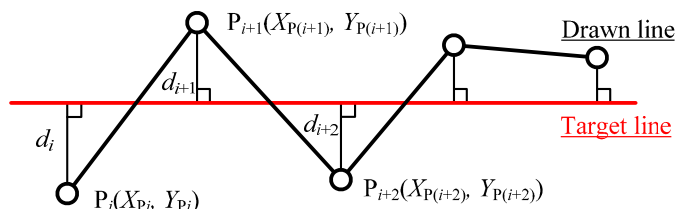


Fig. 7 Calculation method of the position errors. The maximum distance between the measured point  $P_i$  and the target line is used for evaluation of the position error.

描画図形の座標値はペン先の通過座標を30ms間隔で測定した。測定にはタブレット(WACOM:PTZ-631W)を用い、分解能を0.3mmとした。位置決め補助を行ったペン先の各時間の座標値 $P_i(X_{P_i}, Y_{P_i})$ と、式(1)で表される目標

軌跡までの最短距離  $d_i$  を図 7 に示すように誤差として求める。これらの最大値を位置決め誤差として描画した図形の評価および比較に用いる。

図 8(a) に位置決め補助アームを利用して操作者が描いた 60° 方向の直線を目標軌跡とともに示す。なお、測定値は密に連続しているため、各値を直線で結び示す。比較のため同じ操作者がフリーハンドで描いた軌跡、位置決め補助アームの 2 つの関節を制御しロボットアームとして描いた軌跡を示す。同図より、位置決め補助を利用した操作者およびロボットアームによる軌跡は、ほぼ目標軌跡に沿っている。これに対し、フリーハンドによる軌跡は始点および終点付近を除き目標軌跡とは、ずれが生じている。

図 8(b) に各方向への直線描画時に生じた最大位置誤差を示す。位置決め補助アームを用いた場合の誤差は 0.7 ~ 1.0mm の範囲であるが、フリーハンドでは 2.5 ~ 5.1mm となり、方向によるばらつきも大きい。さらに、位置決め補助アームを用いた場合と、ロボットアームとしての描画結果とは同程度の誤差となっており、提案した装置および制御方法により、正確な位置決めを行っていることが確認できる。なお、位置決め補助アームを用いた 90° 方向への描画では動作中に駆動関節の切り替えが生じているが、他方向への描画と同様に正確な位置決め補助が可能であった。

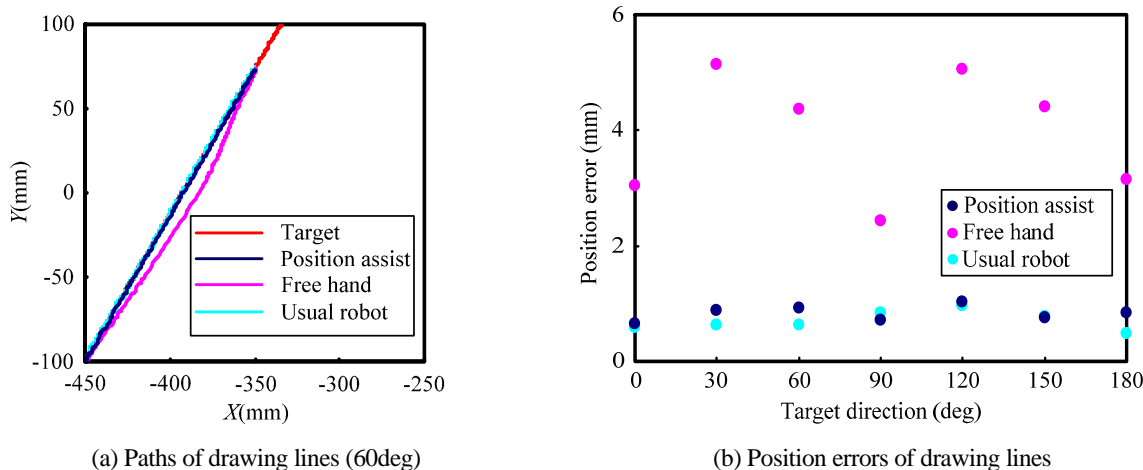


Fig. 8 Comparison of drawing lines by the robot arm for position assistance with free-hand drawing and fully controlled robot arm. The operator using the robot arm for position assistance can draw accurate line comparable to the fully controlled robot.

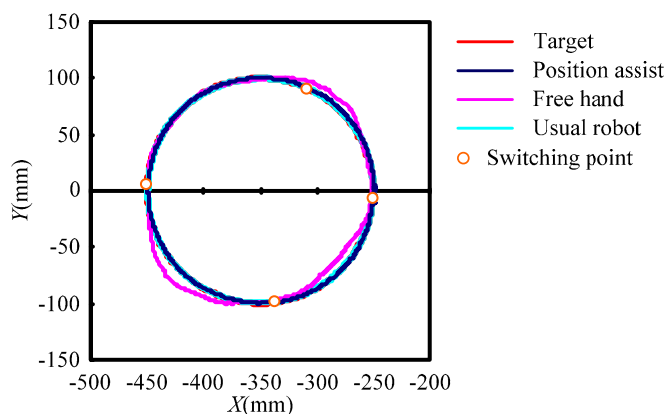


Fig. 9 Comparison of drawing circles by the robot arm for position assistance with free-hand drawing and fully controlled robot. Relatively larger position errors occurred at points where switching between the actuated joint and the passive joint.

円は、ペン先の初期位置を(-450mm, 0)、中心を(-350mm, 0)、半径を 100mm とし、目標軌跡は直線の場合と同様に関数として与えた。位置決め補助アームを用いた場合の描画速度は 10mm/s を目安として指示したが、実際の速度加減は直線描画の場合と同様に操作者にまかせた。測定結果での描画速度の平均値は約 11mm/s であつ



た。直線描画の場合と同様に、フリーハンド、ロボットアームで描いた円の軌跡を図9に、また、それぞれの場合に生じた誤差を表1に比較のため示す。円描画では図9の○の位置で駆動関節が切り替わる。位置決め補助を行った場合の誤差は約1.8mmであり、フリーハンドの場合は約9.8mmであった。直線描画に比べれば誤差は大きいですが、フリーハンドに比べて十分誤差は小さく、全体的にはロボットアームと同程度の軌跡が描けており、動作補助の効果が確認できる。

なお、受動関節と駆動関節の切り替え時には、出力点を駆動するために必要な力が急激に変動するため、操作者は明らかな違和感を覚える。低速に描画を行う場合には以上のように発生する誤差は少ないが、高速に描画する場合は明らかな誤差が発生し得る。高速作業時における駆動関節の切り替えによる力の変動に関しては、その抑制方法や対処方法を今後検討する必要がある。

Table 1 Positioning errors of drawing circles

Method	Error (mm)
Position assist	1.83
Free hand	9.80
Usual robot	1.26

## 6. 凹凸面での図形描画実験

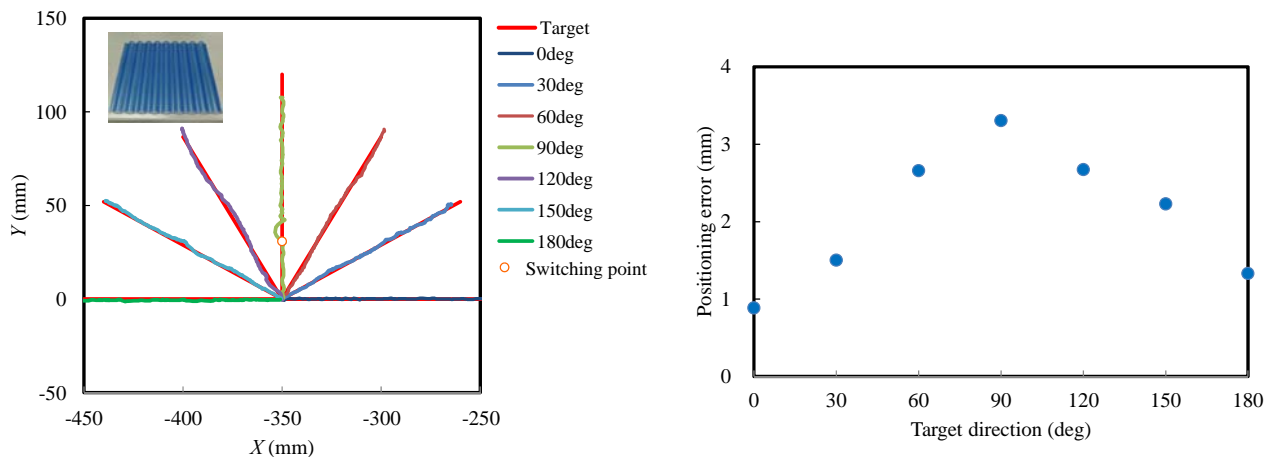
### 6・1 直線の描画

提案する装置の応用分野として、表面の状態が一様でない面に対して加工、描画などを行う場合に、面の状態は人が認識してツールの接触などに関する調整を行い、位置決めに関してロボットアームの補助による高い精度を実現することなどが考えられる。そこで、本論文では波形状の表面に対して人がその凹凸を認識しペンの上下動を調整して、位置決め補助アームの利用により、高精度な描画が行えることを確認する。

本節では、基礎的な動作の確認として、波形状の面に対しての直線描画を行った結果を示す。描画面は、図10(a)中に示す塩ビ製の波板であり、波の高さは9mm、波の間隔は32mmである。同図に示すように、波板の稜線方向をY軸方向とした。描画を行った直線の長さは100mm、方向を0°から180°まで30°間隔の7方向とした。ペン先の初期位置は、図4(a)のXY座標系において(-350mm, 0)とし、式(1)に相当する目標軌跡は直線を表す関数として与えた。描画速度に関して操作者には20mm/s程度を目安として指示したが、実際の速さ加減の調整は平面への描画の場合と同じく操作者が行った。測定結果では、描画速度の平均値は約21mm/sとなった。なお、ペン先の座標は5章と同じくタブレットで測定した。

図10(a)に各方向への直線描画結果の例を示す。図10(b)には各方向の描画結果における位置誤差を5章で述べたとおり求めて示した。なお、波板への描画は平板の場合と比べ、描画結果のばらつきが著しかったため、各方向に3回ずつ描画を行って位置決め誤差を求め、それらの平均値を示した。

図10(a)に示すように軌跡には若干の変動がみられる。また、5章での平板での描画では誤差は1.0mm以下であったが、図10(b)に示すように波板では3mm前後の誤差が生じている。誤差の主な原因は、接触面からペンの横方向に力が作用し、ペンにたわみが生じたことである。そのため、ペンに横方向の力が生じにくい0°および180°方向の描画は比較的精度よく行えている。また、90°方向の描画において、○で示す受動関節と駆動関節の交換位置で比較的大きな誤差が生じている。5章で述べたとおり関節の切り替え時にはペンの移動に必要な力が急激に変動する。平板での描画では、その影響による誤差は少なかったが、ペンの上下動をとまなう波板での描画では、その影響が顕著に現れた。しかし、各方向への誤差の平均値は約2mm、標準偏差は約0.5mmであり、人が面の凹凸に応じてペンを上下動させ、位置決め補助アームによる補正により、ほぼ正確な直線が描かれることが確認できた。



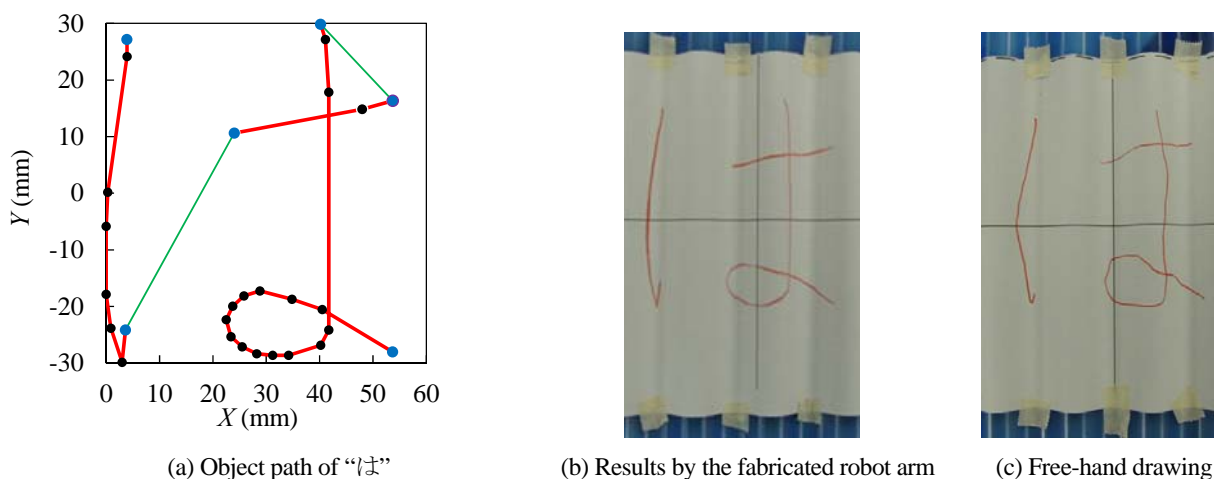
(a) Paths of drawing lines on wave plate

(b) Position errors of drawing lines on wave plate

Fig. 10 Drawing lines on waved surface. Lines were drawn on wave plate by using the robot arm for position assistance. The height of tip of the pen was adjusted by the operator. Although the position errors are greater than those of drawing lines on plane plate, the lines are well drawn by cooperation human and fabricated robot arm.

### 6・2 文字の描画

応用的な図形描画として、前節と同じ波板の表面に文字描画を行った。ここでは、“は”の描画結果を示す。文字描画の目標軌跡は図 11(a)に示すように平面内の離散値として与えた。●は各筆画の始点、終点であり、その間の指定値が●である。各駆動関節の変位量を決定するために、式(1)と式(2)または式(3)との連立方程式を解く際には、離散値間の値を直線補間し求めている。なお、赤線が描画区間であり、緑線はペンを接触させない区間である。それぞれの区間のペンの上下動は操作者が実施する。ただし、●の位置では2つの関節のモータをいずれも励磁し、位置決め補助アームを停止させ、作業者に筆画の始点または終点であることを認識させる。



(a) Object path of “は”

(b) Results by the fabricated robot arm

(c) Free-hand drawing

Fig. 11 Drawing result of a character “は” on waved surface by the fabricated robot arm. The object data were given as discrete values. The range between the discrete values was subjected to linear interpolation. The character is well drawn on the waved surface compared to the result by free-hand drawing.

図 11(b)にロボットアームによる位置決め補助を利用して描いた結果を示す。また、比較のため、図 11(c)にはフリーハンドでの結果を示す。なお、操作者にはあらかじめ、目標軌跡を見せており、フリーハンドの結果は目標軌跡を見ながらの描画結果である。なお、文字の描画速度に関しては、操作者に指示を与えず加減をまかせた。また、タブレットによるペン先の位置および速度の測定は略した。

位置決め補助アームを用いた描画時には、人がペンを面に沿って上下動することで、なめらかに文字を描くことができた。また、図 11(b)に示すように位置決め補助を利用すれば、図 11(c)に示すフリーハンドの場合に比べ

て、より目標軌跡に近い文字が描かれている。よって、提案する装置を用いれば表面に凹凸が存在する複雑な面に対して、目標とする軌跡に正確に沿った作業を行い得る。

以上、本論文で製作した位置決め補助アームはロータリエンコーダによる関節の角変位の測定結果によって人の位置決め補助が可能である。人とロボットの協調作業を同様に実現する方法としては、緒言で述べたようにインピーダンス制御を用いて各関節のアクチュエータを駆動する方法が考えられる。しかし、インピーダンス制御を用いる場合は、ロータリエンコーダなどに加えて力覚センサを出力部や各関節に設けて力制御を行わなければならない。力覚センサは、目的とする作業に応じた測定範囲、分解能を明確にして慎重に選択する必要がある、また、一般に高価である。さらに、インピーダンス制御では、機構の剛性や外力に応じた適切な制御パラメータを用いなければならないが、通常、その設定は複雑である(岡本他, 2013)。特に問題となるのが、剛性の高い面との接触時に制御が不安定になりやすいことであり(積際他, 2004)、例えば以上で示したような凹凸面との接触のように剛性の高い方向が刻々と変化する場合は制御は困難であると予想される。これに対し、製作した位置決め補助アームは力の測定を必要とせず、以上のような凹凸面との接触時に、接触面の法線方向とともに力の作用方向が変化していく場合も、人の判断により力の加減を変化させ安定して動作が行えることから、廉価で応用範囲が広い人との協調作業が可能な装置となることが期待できる。

## 7. 結 言

人の位置決め動作の補助を目的として、幾何学的に拘束されていない受動関節を利用したロボットアームを提案した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 幾何学的に拘束されていない受動関節をロボットアームに設けて、同アームの出力点を外力によって移動可能とし、人が目標とする軌跡に沿って出力点を移動させようとしたときに、出力点が目標軌跡に沿って移動するようにアクチュエータで駆動する関節を制御することで、人の位置決め動作を補助する装置を提案した。
- (2) 提案するロボットアームには、人が目標軌跡に沿ってアームの出力点を移動させることが困難となる特異姿勢が存在する。この特異姿勢を回避する方法として、目標軌跡に沿った人の動作による受動関節の回転変位量が、駆動関節の変位量より相対的に大きくなるよう、受動関節と駆動関節を切り替える方法を提案した。
- (3) 平面図形の描画を対象とした、位置決め補助用のロボットアームを製作して、具体的な制御方法を示し、直線、円の描画を行った。その結果、これらの図形が、全ての関節をモータで制御するロボットアームに近い精度で描くことができ、提案する装置の妥当性を確認した。
- (4) 表面に凹凸が存在する波板を対象に、面に沿ったペンの上下動は人が行い、位置決めは製作したロボットアームで行うことにより、文字の描画を行った。その結果、目標軌跡に沿った文字の描画が行え、本装置の実用可能性を示した。

以上、本論文で提案したロボットアームは特殊な機構を用いず、また、ロータリエンコーダのみを用いた単純なPI制御で、人との協調動作による正確な位置決めが可能である。同ロボットアームは剛性の高い面に対する作業も可能と考えられるので、今後は加工時の位置決め補助装置、また、加工作業の教示装置としての応用を検討する。また、構造が単純であることから、装着型のリハビリテーション機器、義肢などへの利用も図っていく。そのためには、同ロボットアームのさらなる多自由度化が求められる。多自由度化の方法としては、例えば図1において、同ロボットアームをY軸周りに回転、または、XY平面に垂直な軸方向に並進変位可能とする関節を加え、同関節を駆動関節として出力点の移動方向が目標軌跡となるように制御することが考えられる。また、出力点の目標軌跡をあらかじめ定められた軌跡でなく、適宜変更可能として作業の自由度を増加させるために、移動方向を簡単な入力で逐次指定可能なインターフェイスの利用が考えられ、今後、これらを考慮した多自由度な位置決め補助用のロボットアームを開発する。

## 謝 辞

本研究に協力いただいた元金沢大学大学院生 川瀬尚希氏、船越雄貴氏、静内誠氏に深く感謝いたします。

## 文 献

- Goswami, A., Peshkin, M. and Colgate, J.E., Passive robotics: An exploration of mechanical computation, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1(1990), pp.279-284.
- Goswami, A. and Peshkin, M., Mechanically implementable accommodation matrices for passive force control, International Journal of Robotics Research, Vol.18, No.8(1999), pp.830-842.
- 樋口峰夫, 人間共存型補助アーム Pas-Arm の開発(基本構想とメカニズム), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.730(2007), pp.156-162.
- 樋口峰夫, 人間共存型補助アーム Pas-Arm の開発(メカニズム・CVT の設計と機能検証システム), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.749(2009), pp.104-112.
- 井上亮, 積際徹, 横川隆一, 外界との接触状況検出機構を有する人とロボットの力学的協調システムの開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.805(2013), pp. 2981-2991.
- 石井峰雄, 山本圭治郎, 兵頭和人, 完全独立型パワーアシストスーツの開発: 機構の改良と実用可能性, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.715(2006), pp.857-864.
- 岡本健太郎, 積際徹, 横川隆一, 人とロボットの協調位置決め作業における人の運動習熟に関する一考察, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.803(2013), pp.2394-2407.
- Peshkin, M. and Colgate, J.E., Cobots, Industrial Robot, Vol.26, No.5(1999), pp.335-341.
- Peshkin, M., Colgate, J.E., Wannasuphprasit, W., Moore, C., Gillespie, B. and Akella, P., Cobot architecture, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.17, No.4(2001), pp.377-390.
- 佐々木大輔, 則次俊朗, 山本裕司, 高岩昌弘, 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.5(2006), pp.640-646.
- 武居直行, 菊植亮, 佐野明人, 望山洋, 澤田英明, 藤本英雄, 位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.2(2007), pp.306-313.
- 田中英一郎, 池原忠明, 小俣透, 大和田崇文, 永村和照, 池条清隆, 坂本健, 井上裕介, 足裏から下肢全体を支援する歩行補助機の開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.774(2006), pp.3871-3877.
- 積際徹, 横川隆一, 原敬, 人間とロボットによる協調運搬・精密はめあい(Peg-in-Hole)作業における制御法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.689(2004), pp.69-76.
- 積際徹, 横川隆一, 原敬, 人間とロボットによる協調作業における人間の手先剛性の推定にもとづく可変インピーダンス制御(人間とロボットによる協調書道), 設計工学, Vol.38, No.4(2003), pp.195-201.

## References

- Goswami, A., Peshkin, M. and Colgate, J.E., Passive robotics: An exploration of mechanical computation, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1(1990), pp.279-284.
- Goswami, A. and Peshkin, M., Mechanically implementable accommodation matrices for passive force control, International Journal of Robotics Research, Vol.18, No.8(1999), pp.830-842.
- Higuchi, M., Development of a human symbiotic assist arm PAS-Arm: Basic concept and mechanism, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.73, No.730(2007), pp.156-162 (in Japanese).
- Higuchi, M., Development of a human symbiotic assist arm PAS-Arm: Design of mechanism · CVT and experimental system, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.75, No.749(2009), pp.104-112 (in Japanese).
- Inoue, R., Tsumugiwa, T. and Yokogawa, R., Development of human-robot cooperative system equipment with mechanism to detect the contact conditions between robot and external environment, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.803(2013), pp.2394-2407 (in Japanese).
- Ishii, M., Yamamoto, K. and Hyodo, K., Standalone wearable power assisting suit: Development and availability, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.72, No.715 (2006), pp.857-864 (in Japanese).
- Okamoto, K., Tsumugiwa, T. and Yokogawa, R., Analysis evaluation method for a human motion skill proficiency for human-robot cooperative positioning task, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.803(2013), pp.2394-2407 (in Japanese).
- Peshkin, M. and Colgate, J.E., Cobots, Industrial Robot, Vol.26, No.5(1999), pp.335-341.
- Peshkin, M., Colgate, J.E., Wannasuphprasit, W., Moore, C., Gillespie, B. and Akella, P., Cobot architecture, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.17, No.4(2001), pp.377-390.

- Sasaki, D., Noritsugu, T., Yamamoto, Y. and Takaiwa, M., Development of power assist glove using pneumatic artificial rubber muscle, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.24, No.5(2006), pp. 640-646 (in Japanese).
- Takasue, N., Kikuue, R., Sano, A., Mochiyama, H., Sawada, H. and Fujimoto, H., Force-dependent variable damping control for positioning task assist, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.25, No.2(2007), pp. 306-313 (in Japanese).
- Tanaka, E., Ikehara, T., Omata, T., Owada, T., Nagamura, K., Ikejo, K., Sakamoto, T. and Inoue, Y., Development of a walking assist machine supporting whole legs from their soles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.72, No.774(2006), pp.3871-3877 (in Japanese).
- Tsumugiwa, T., Yokogawa, R. and Hara, K., A control strategy for human-robot cooperative carrying and peg-in-hole task, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.689(2004), pp. 69-76 (in Japanese).
- Tsumugiwa, T., Yokogawa, R. and Hara, K., Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative task: Human-robot cooperative calligraphic task, *Design Engineering*, Vol.38, No.4(2003), pp. 195-201 (in Japanese).