作業者の操作性を考慮した着脱式姿勢可変型直接教示装置の開発*

鄭 聖 熹^{*1}, 中 坊 嘉 宏^{*2}
尾 暮 拓 也^{*2}, 山 田 陽 滋^{*3}Development of an Attachable and Pose-changable Direct Teaching Device
Considering OperabilitySeonghee JEONG^{*4}, Yoshihiro NAKABO,
Takuya OGURE and Yoji YAMADA^{*4} Department of Electro-Mechanical Engineering, Osaka Electro-Communication University,
18-8 Hatsu-cho, Neyagawa-shi, Osaka, 572-8530 Japan

This paper proposes a direct teaching device for a multi-D.O.F industrial manipulator considering a worker's safety and operability. The proposed device named as APDT, Attachable and Pose-changable Direct Teaching device, is composed of a pose adjusting part and a teaching handle part. It is capable of easy mounting/unmounting on a robot end-effector and of adjusting a pose of a teaching handle freely without consideration of the pose of an end-effector. By using APDT, a worker is able to perform a direct teaching task for a multi-D.O.F manipulator in a comfortable posture even in case of teaching in the large pose change of the end-effector by adjusting the pose of the teaching handle. This will bring the reduction of load of a worker in a long time teaching task. Consequently, the reduction of risk due to inappropriate work posture and the improvement of task efficiency is expected. Simple direct teaching task using APDT with SP02, cell-production robot, was conducted to confirm the effectiveness of APDT.

Key Words: Direct Teaching Device, Pose-Changable, Operability, Safety

1. は じ め に

1.1 開発背景 近年、製造業分野では少子高齢化や熟練者不足等による生産性の悪化、製品品質の低下等の問題が懸念され、その対策の一つとして、ロボットシステムの製造現場への導入が積極的に進められている。多自由度マニピュレータは、自動車生産ラインや造船現場、情報家電製造ライン等において、溶接や塗装、組み立て、検査等の作業に幅広く用いられる代表的な産業用ロボットシステムである。多自由度マニピュレータを用いて作業を行うためには、通常、「教示作業」と呼ばれるロボットの作業動作を予め「教える」工程が必要となる。これまで、教示時間の短縮、教示精度の向上等教示作業の効率改善を目的とした教示方法がいくつか提案されており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、直接教示(ダイレクトティーチ)もその代表的な方法である⁽⁴⁾。

直接教示は、ロボットの先端に教示作業(以下、作

業者)の力を検出する直接教示装置を設け、作業者の操作力に追従するようロボットを制御して動作を教え込む教示方法である。この方法は、作業者が直接に多自由度マニピュレータの先端を把持して操作を行うので、ペンダントやGUI等従来の方法でのロボット動作と作業者の操作感覚のズレによる教示作業効率の低下を防ぐことができ、複雑な教示作業の場合でも効率よく教示作業を行うことが可能である。直接教示では作業者がロボット先端の教示ハンドルを直接把持して教示を行うため、作業者の教示姿勢を含む「操作性」を十分に考慮しなければならない。操作性の低下は作業効率及び作業精度への影響のみならず、作業者の精神的・肉体的障害を引き起こす要因でもある。したがって、作業性(効率や精度)と安全性(精神的・身体的障がい)を考慮した操作性を持つ教示システムの構築は重要な課題であると言える。

1.2 関連研究 産業用多自由度マニピュレータ用の直接教示装置としては、力センサ(又はオブザーバ等により力を検出する手段)が手首に内蔵されている内蔵型と、力センサを含む教示ハンドル装置がロボット本体と独立に構成される外装型に別けられる。内蔵

* 原稿受付 2010年7月13日。

^{*1} 正員、大阪電気通信大学電子機械工学科(〒572-8530 寝屋川市初町18-8)。^{*2} (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1)。^{*3} 正員、名古屋大学工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail: s-jeong@isc.osakac.ac.jp

型は力制御を要する作業を行うマニピュレータに一般的に用いられるものであり⁽⁶⁾、外装型は力制御を必要としない PTP(Point To Point) や CP(Continuous Path) 制御等に用いられるマニピュレータに導入される。本研究では、組み立て、溶接、塗装等の作業において、主に PTP や CP 制御されるマニピュレータ用の外装型直接教示システムを対象とする。

これまでの外装型直接教示装置の場合、作業者が把持する教示ハンドルは姿勢の調整ができない固定式⁽⁷⁾が殆どであった。姿勢の調整が可能な教示ハンドルを持つ直接教示装置も提案されているが⁽⁸⁾、教示ハンドルの取り付け位置が決められており、ハンドルの姿勢調整角には限界がある。このような従来型教示ハンドルを用いてマニピュレータ先端の大きな姿勢変化が必要な教示作業を行う場合、作業者は手首や肘等の関節を大きく曲げる不自然な姿勢で教示作業を実行せざるを得ない。長時間に及ぶ無理な姿勢での作業は、精神的・肉体的に疲労が蓄積されやすく、結果的に、注意力の低下による操作ミスや無理な姿勢による発病等安全性を大きく低下する要因になると指摘されている⁽⁹⁾。さらに、生産性の観点からみると、集中力の低下や不自然な姿勢での作業は作業効率や作業品質の低下を招く要因としても考えられる。

1.3 開発目標 本研究は、生産現場での直接教示作業において、作業者の不適切な教示姿勢に起因するリスクの低減及び教示作業効率の向上が実現可能な操作性の高い直接教示システムの開発を最終目標とする。

本稿では、本質安全設計の非制御手段⁽⁵⁾である人間工学原則を考慮した操作性を有する「着脱式姿勢調整型直接教示装置」を提案する。同装置は、教示ハンドルを必要な時に簡単に着脱でき、マニピュレータ先端姿勢が大きく変化する教示作業の場合でも、教示ハンドルの姿勢調整により作業者が無理なく教示ハンドル操作が可能な特徴を持つ。さらに、教示力やハンドル姿勢検出センサをハンドルに内装したモジュール化により、1 台の教示モジュールで複数のロボットの教示が実現でき、設備投資等のコストダウンが期待できる。本稿では、提案する装置の着脱及び姿勢調整機構、姿勢調整時の教示アルゴリズムを中心に述べ、最後に、簡単な直接教示作業実験を通して、同装置の教示作業遂行性能の検証及び教示作業時の作業者の姿勢についての検討を行う。

以降、2 章では、開発した着脱式姿勢可変型直接教示装置のメカニズム及び基本動作原理を、3 章では、教示ハンドル部の姿勢計測方法及び計測精度評価結果について述べる。最後に、4 章では、本教示装置を用

Fig. 1 SP02 and a cell workspace

いた簡単な直接教示及び再生実験を実施し、装置の教示性能及び教示作業時の作業者の教示姿勢の簡易評価結果について述べる。

2. 着脱式姿勢可変型直接教示装置

2.1 開発コンセプト 本研究で開発する直接教示装置は、図 1(a) に示す上体ヒューマノイドロボット SP02⁽¹⁰⁾ のマニピュレータへの搭載を前提とする。SP02 は図 1(b) のようなセル生産現場において、PTP 制御による Pick and Place 作業の実行を目的に開発されたロボットであり、各 6 自由度の双腕を持つ。教示作業を実行する際に、作業者は SP02 の隣でマニピュレータの先端に直接教示装置を装着し、教示ハンドルを把持・操作することで実際の作業工程を教え込むことになる。開発する直接教示装置の機構設計におけるコンセプトを以下に示す。

1. ロボットの手先先端の姿勢に係わらず、作業者が安定な姿勢で教示ハンドルを簡単に着脱できる機構。
 2. 教示ハンドルを手先先端へ装着後、作業者が作業しやすいようにその姿勢調整が自由にできる機構。
- (1)により、チョコ停等のロボット停止時の手先先端姿勢に係わらず、作業者が安定な姿勢で迅速に教示作業を実施した後、再び通常運転へ復帰することが可能なので、結果的に生産性の向上が期待できる。また、(2)により、手先先端の姿勢が大きく変わる教示作業時に、作業者の手首や肘、腰関節への姿勢負担が軽減され、教示作業の安全性及び作業効率の向上が期待できる。さらに、本稿での開発段階には含まれていないが、最終開発目標として、ロボットの追従動作制御部へ教示情報(教示力、ハンドル姿勢)を提供する独立した教示情報生成部と上記機構を組合せ、直接教示モジュールを構成することも可能である⁽¹¹⁾。これにより、1 台の教示モジュールで複数のロボットの教示が実現でき、設備投資等のコストダウンが期待できる。

Fig. 2 Prototype of Attachable and Pose-changable Direct Teaching device

2.2 着脱式姿勢可変型直接教示装置 図2に前述のコンセプトを基に開発した着脱式姿勢可変型直接教示装置 (Attachable and Pose-changable Direct Teaching device, APDT) のプロトタイプを示す。同装置は、マニピュレータ先端に固定される姿勢調整部と、ロック機構により姿勢調整部に着脱される教示ハンドル部で構成される。

同図において、姿勢調整部は教示ハンドルの着脱機能を行うロック機構、教示ハンドルのロール及びピッチ角を調整する姿勢調整用レール及びスライダ機構で構成される。アーチ上のレールはマニピュレータの先端付近の所定の位置に予め固定され、ピッチ角調整用スライダー上に位置する爪タイプのロック機構で教示ハンドル側の接続用板をワンタッチでロック又は開放する。姿勢調整用の各スライダーは、位置決め操作レバーを反時計方向へ回すことで各レールが

Table 1 Parameter description

Σ_r	Robot coordinates
Σ_{hd}	Handle coordinates
Σ_{fs}	Force sensor coordinates
Σ_h	Hand coordinates
${}^r_{hd}R$	Rotation matrix between robot and handle
${}^{hd}_{fs}R$	Rotation matrix between handle and force sensor
r_hR	Rotation matrix between robot and hand
${}^h_{hd}R$	Rotation matrix between hand and handle
${}^r_f, {}^r_n$	Force/Moment according to Σ_r
${}^{fs}_f, {}^{fs}_n$	Force/Moment according to Σ_{fs}

ら開放され、自由にスライドすることができる。したがって、教示ハンドル部のロール角はアーチ上のロール角調整用レール上をロール角調整用スライダーがスライドすることで調整でき、ピッチ角はピッチ角調整用スライダーがロール角調整用スライダーの円周をピッチ角回転軸を中心に回転することで調整できる。姿勢調整後は、位置決め操作レバーを時計方向に回すことで各スライダーが全てレールに拘束され、教示ハンドル部の姿勢角が固定される。教示ハンドル部は、3ポジションイネーブルスイッチ、教示ハンドル、姿勢角センサ、力センサで構成される。3ポジションイネーブルスイッチは、教示作業の許可信号を生成するものであり、産業用ロボットの国際安全規格 ISO10218 において装着が規定されている。姿勢角センサ (InertiaCube3, InterSense 社) は、教示ハンドル部を姿勢角調整部に装着した際又は装着後姿勢角調整を行った場合に、ハンドル及び力センサの姿勢角を直接に計測するために用いられる。最後に、6軸力覚センサ (Nitta 製) は直接教示の追従制御に用いられる作業者の教示力を検出する。開発した教示ハンドル部は、直接教示制御に必要な情報を生成するスイッチ及びセンサ要素がモジュール化されているのが特徴的である。これにより、教示ハンドル部の着脱時の空間的制約が緩和され、幅広い範囲における姿勢調整機能が実現できる他、直接教示システム全体のモジュール化も容易となる。

図3に開発した APDT を SP02 のマニピュレータ先端へ導入し、ハンドル操作を行う様子を示す。同図から、教示ハンドル部の装着、ロール姿勢角調整、ピッチ姿勢角調整、位置決め、教示ハンドル部の取り外し等の一連の動作が確認できる。

3. 教示情報の取得及び評価検証

3.1 操作力の座標変換 マニピュレータ先端が作業者の操作力に忠実に追従するためには、操作力が

Fig. 3 A series of motion of introduction and operation of APDT to SP02 (mounting, pose adjusting, and dismounting)

Fig. 4 Robot end-effector model with an APDT

基準座標系へ正しく変換される必要がある。そのためには、マニピュレータ先端運動時において、力センサ姿勢の正確な計測及びロボット座標系への正しい変換が重要である。

APDTを装着したマニピュレータ先端の幾何学モデルを図4に、各記号の定義を表1に示す。本稿では、操作力追従制御方法として、可変コンプライアンス制御法を用いる⁽¹²⁾。コンプライアンス制御における手先先端の運動方程式は、

$$M\ddot{x}_d + D\dot{x}_d = {}^rF \quad (1)$$

であり、 M 、 D はそれぞれ手先先端の望ましい慣性及び粘性を表す。操作力のロボット座標系での表現 rF は、

$${}^rF = \begin{bmatrix} {}^rf \\ {}^rn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^r_{fs}R & 0 \\ I & {}^r_{fs}R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^fsf \\ {}^fsn \end{bmatrix} \quad (2)$$

であり、ここで、

$${}^r_{fs}R = {}^r_{hd}R {}^hd_{fs}R \quad (3)$$

I は単位行列である。なお、ロボット座標系と力センサ座標系は同じ原点を持つとし、ハンドル座標系と力センサ座標系は教示ハンドル部に固定されているので ${}^hd_{fs}R$ は不変である。したがって、ハンドルの回転行列 ${}^r_{hd}R$ を常時求めることができれば、式(2)から rF を計算し、教示追従制御への入力として用いることができる。

マニピュレータ先端が動作中の ${}^r_{hd}R$ は、教示ハンドル部の姿勢角センサのみ、又は、教示ハンドル部装着時の初期姿勢角とマニピュレータの内界センサを併用して求めることができる。前者は、教示追従制御のリアルタイム性を保証するために、姿勢角センサの姿勢角検出サイクルタイムがロボットの教示制御サイクルタイムより短い場合に有効な方法である。これに対して後者は、教示情報検出サイクルタイムがロボットの制御サイクルタイムより長い、教示装置がリアルタイム通信機能を装備していない場合に有効である。本稿では、(1)ハンドル姿勢検出センサの検出サイクルタイムが長い(最短10[ms])、(2)教示情報生成装置のリアルタイム通信機能の不備、(3)連続計測時の測定エラー(特に磁気センサ)の発生可能性等の理由により、後者を用いて教示追従制御時の ${}^r_{hd}R$ をリアルタイムで計測する。

マニピュレータ先端部の幾何学的条件から、

$${}^r_{hd}R = {}^r_hR {}^h_{hd}R \quad (4)$$

であり、 r_hR はロボット側から計測できるので ${}^h_{hd}R$ が既知であれば ${}^r_{hd}R$ が計算できる。 ${}^h_{hd}R$ はハンドルを先端に取り付けた時の初期姿勢角情報と先端の姿勢情報から次式で求めることができる。

$${}^h_{hd}R = ({}^r_{hi}R)^{-1} {}^r_{hd}R_i = {}^h_{ri}R {}^r_{hd}R_i \quad (5)$$

ここで、 ${}^r_{hi}R$:ハンドル装着時のハンドルのロボット座標系における姿勢角、 ${}^r_{hd}R_i$:ハンドル装着時のハンドル

Fig. 5 Relation of the coordinates on an end-effector

のロボット座標系における姿勢角である。式 (4), 式 (5) から,

$${}^r_{hd}R = {}^r_h R {}^h_r R {}^r_{fs} R {}^r_{hd} R_i \quad (6)$$

の関係が得られる。式 (6) を用いることでロボットの動作中にハンドルの姿勢角をリアルタイムで計測することができ、その情報を用いて操作力を追従制御部へ正しく変換することができる。

3.2 初期姿勢角計測評価 手先先端の様々な姿勢において、教示ハンドル部の装着時の力センサの姿勢角計測精度を調べるための評価実験を行う。評価は、ロボット座標系において、ロボット側の内界センサによる順運動学計算を用いた場合と姿勢角センサを用いた場合の力センサ座標系の姿勢角を比較することで行う。

図 5 に評価実験における SP02 の手先先端と APDT との軸間関係を示す。まず、ロボットの内界センサを用いた順運動学計算において、力センサ座標系のロボット座標系への回転行列は、

$${}^r_{fs}R = {}^r_h R {}^h_{fs}R \quad (7)$$

となる。また、姿勢角センサを用いた力センサ座標系のロボット座標系への回転行列は次式で表すことができる。

$${}^r_{fs}R = {}^r_{hd}R {}^h_{fs}R \quad (8)$$

ここで、

$${}^r_{hd}R = \text{Rot}(X, \pi) \text{Rot}(Z, \theta_w) \text{Rot}(Y, \theta_p) \text{Rot}(X, \theta_r)$$

であり、 $\theta_r, \theta_p, \theta_w$ は姿勢角センサからの姿勢角情報である。式 (7) と式 (8) から求めた力センサの回転行列から各々姿勢角を計算し、比較することで、同装置の姿勢角計測精度を評価することができる。

力センサ座標系の姿勢計測検証実験方法を以下に述べる。まず、教示ハンドル部を初期状態で図 5 のよう

Fig. 6 Measurement varification of a posture sensor

に手首の第 5 軸、6 軸の間に装着する。その後、SP02 の動作 API を用いて、手先先端座標系 (第 6 軸座標系) をロール、ピッチ、ヨー方向に回転する。その都度、ロボット運動学計算関数から求めた力センサ座標系 (式 (7)) と姿勢角センサを用いた力センサ座標系 (式 (8)) の姿勢角を求め、両方を比較する。

図 6 に手先先端のロール、ピッチ、ヨー方向の独立回転の場合の実験データを示す。同図 (a)(c)(e) は、各実験において、両方法で計測した力センサ座標系の姿勢角がほぼ一致していることを表しており、(b)(d)(f) は、その差分値がロール、ピッチ角に関しては -1 から 2 度内、ヨー角の場合は -3 から 3 度であることを示している。ヨー角の差分値が大きい理由としては、モータの磁場の影響を無くすために姿勢角センサのコンパス機能を OFF にしており、ジャイロセンサの蓄積誤差の修正がなされないのが考えられる。

以上の評価実験から、任意の姿勢のマニピュレータ先端に直接教示ハンドル部を装着する際、内蔵の姿勢角センサを用いて数度程度の誤差範囲内で力センサの姿勢計測が可能であることが確認できた。

4. 直接教示検証実験

本章では、SP02 への直接教示作業において、直接教示性能及び作業者の作業姿勢に対する APDT の有効性を検証する実験を行う。図 7 に実験装置のシステム

4-1 教示ハンドルの姿勢角誤差の影響 教示ハンドルの姿勢角のずれが教示性能に与える影響を調べる実験を行う。検証実験では、教示ハンドル部を図5のように初期セット後、図8に示す教示ターゲットの上面正方形4点(各辺長25cm)を一周する教示作業を教示ハンドル部の姿勢角誤差無し(CASE 1)、誤差小(CASE 2)、誤差大(CASE 3)の三つの方法で実行し、教示操作性について検討する。CASE 1では、教示ハンドル部を初期姿勢の状態で作動し、教示を行う。この場合では、教示ハンドル部の姿勢をロボットの運動学計算により誤差なく検出する。CASE 2の場合は、姿勢調整機構を用いて教示ハンドル部を初期姿勢から変更するが、変更された姿勢角は姿勢角センサによ

Fig. 9 Direct teaching performance according to the pose error of the teaching handle part

図9に各実験における教示ハンドルの初期姿勢、及び各教示追従動作におけるロボット手先先端の軌跡を示す。各実験における教示ハンドル部初期姿勢角は、CASE1の場合、ロール0度、ピッチ0度、ヨー20度であり(図9(a))、CASE2、CASE3の場合は、ロール-50度、ピッチ34度、ヨー-19度である(図9(b))。図9(c)において、CASE1及びCASE2は手先先端の教示追従運動性能がよく、追従軌跡が滑らかな四角形を描いている。これに対し、CASE3の場合は、四角形の辺部分の教示においては比較的良い追従性能を見せるが、方向が大きく変わる各頂点において軌跡に大きな凹凸が発生している。これは、一方向の運動に対しては人間側が姿勢角の誤差分をうまく補正してハンドル操作を行っているが、角の部分では運動方向が大きく変わるので人間側の補正がうまく行われなかったためである。

これらの実験結果から、ある程度の誤差を含む姿勢角センサを用いた場合でも、作業者の意図に近い指示追従性能を実現できることが確認できた。しかし、誤

Fig. 10 Direct teaching and playback experimental result using APDT

差角が大きくなった場合は、軌道によっては作業者の補正機能が十分に働かず、追従動作が乱れることになる。したがって、姿勢角度誤差が教示追従性能に及ぼす影響をより詳しく調べることで、ハンドル姿勢調整角分解能の選定など教示システムをより最適に設計することができると考えられる。

4.2 直接教示及び再生検証 ロボットの手先姿勢が大きく変化する教示作業において、APDTを用いた直接教示及び教示後再生の一連の教示作業工程を実行し、同装置の教示作業遂行性能、及び作業者の教示姿勢を評価する。

実験では、図8の教示ターゲットの上面4点と側面4点の教示を行う。各教示点の情報は作業者が手元の操作スイッチ盤の「教示情報取得ボタン」を押すことで工程管理システムに入力され、教示後、再生へスイッチの切替えによりSP02は入力された教示点を再現する。被験者となる作業者には、各点を移動する際に可能な限り各点を結ぶ辺に沿って移動するようにし、また、側面の教示においては、負担のかからない姿勢で作業ができるようにハンドル部姿勢を変更するように指示した。被験者(男性、1名)は、APDTの操作方法を習得しており、検証用の教示工程が滑らかに実行できるように事前に十分な練習を行っている。

(a) Case of without adjusting the handle pose (b) Case of adjusting the handle pose

Fig. 12 Pose of an operator in the leftside direct teaching

図10に教示及び再生作業の実験結果を、図11に教示中の作業者及びロボットの一連の動作様子をキャプチャした写真を示す。図10(a)は教示及び再生時の手先先端の軌跡を表しており、教示時の先端軌跡が上面及び側面四角形の形状を凹凸なく描いていることが分かる。また、教示再生時のハンドの軌跡も教示ポイントを忠実に実現していることから、教示が正常に行われていることが確認できる。図10(b)は教示作業中の教示ハンドル部の姿勢角データである。同図において、上面教示から側面教示に作業工程を変更する際、作業者はa時点から手先先端と一緒にハンドル部のロール角をほぼ $-70[\text{deg}]$ まで回転している。その後、不適切な姿勢を直すために、b時点からハンドル部のみロール角を約 $-10[\text{deg}]$ に調整した後、教示作業を行っていることが確認できる。

図12は側面教示作業におけるハンドル姿勢角調整なしと調整ありの場合の作業者の姿勢である。同図から分かるように、APDTのハンドル姿勢角の調整により肘関節や腰関節の負担が軽くなっており、長時間の教示作業時の不適切な姿勢に起因するリスクの低減が期待できる。しかし、ハンドル姿勢角調整無しの場合についても同教示作業を実施した結果、姿勢角調整ありの場合と比較して教示時間や精度に大きな差はないことが確認された。これは、今回行った教示作業が単純で所要時間も短かったためであり、より長時間の教示作業における評価が必要であると考えられる。

5. おわりに

本稿では、多自由度マニピュレータの直接教示作業において、教示作業効率の向上を目的とした高い操作性を提供する姿勢可変型直接教示装置を提案した。同装置を用いた操作性検証実験により、作業者が多自由度マニピュレータの先端姿勢に影響されることなく、必要な時に教示ハンドル部を装着し、自然な姿勢で直接教示作業を実行できることが確認できた。本稿では、提案装置の教示作業遂行性能及び作業者の教示姿勢の

Fig. 11 Screenshot of a series of motion of direct teaching and playback

定性的評価に留まっている。

今後、長時間の教示が必要な教示作業において、作業者の疲労蓄積による教示時間及び教示精度の評価を行い、同装置の操作性の優位性をより明確にする予定である。

文 献

- (1) Yukihiro Nakamura, Kenichi Arakawa: Teaching via Multimodal Communication, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.17, No.2, (1999), pp.166-169.
- (2) Tamio Arai, Toshiyuki Itoko, Hidetoshi Yago, Visual Robot Programming System, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.17, No.2, (1999), 186-189.
- (3) Yoichi Nagao, Kazuhiko Onoue, Teaching Method and Open Architecture Controller for Industrial Robots, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.4, (2000), pp.486-490.
- (4) Yoshihiro Mochizuki, Takashi Matsui, Direct Teaching Method for Hybrid Control Applying Impedance Control, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.12, No.2, (1994), pp.328-334.
- (5) ISO 12100-1:2003: Safety of machinery- Basic concepts, general principles for design (2003)
- (6) Shin-yo Muto, Ken-ichiro Shimokura, Teaching and Control of Robot Contour-Tracking Using Contact Point Detection, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.15, No.5, (1997), pp.744-751.
- (7) Yaskawa Electric Co., Teaching Device of Robot, *Tokukai*, H8-216074, (1996).
- (8) Yaskawa Electric Co., Handle for Direct Teaching, *Tokukai*, H8-276387, (1996).
- (9) Fumiyo Saijo, Posture and Motion. Working Postures and Physical Load, *Rigakuryoho*, Vol.10, No.3, (1995), pp.127-134.
- (10) T.Ogure, Y.Nakabo, S.Jeong, Y.Yamada: Hazard Analysis of an Industrial Upper-body Humanoid, *Industrial Robot*, No.35, Vol.5, 469/475 (2009).
- (11) AIST, Pose Changable Direct Teaching Module, *Tokugan*, 2009-116141, (2009).
- (12) Y.Yamada, H.konosu: Proposal If Skill-Assist: A system of Assisting System for Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks, *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IV11-16 (1999)