フレキシブル組立センタの開発*

宇野正人** 谷口一郎*** 杉本浩一†
三田徹† 坂上志之† 大成尚**

Development of a Flexible Assembly Center

Masahito UNO, Ichiro TANIGUCHI, Koichi SUGIMOTO

Toru MITA, Sisyuki SAKAUE and Hisashi ONARI

The authors created a flexible assembly center that can be organized to meet the needs of various assembly operations. For this, a precision autonomous robot that does not require a teaching process was developed. The flexible assembly center is composed of multiple table robots, arm robots, and part/tool feeders, and has the following characteristics (1) Complicated operations can be performed by using the flexible arm and table setup. (2) The positioning accuracy necessary for precision assembly can be maintained through the use of direct drive mechanisms and auto-calibration, without requiring a teaching process. (3) Precise operation can be accomplished autonomously by real-time control with visual and force sensor feedback. This system is particularly effective for production systems involving frequent setup changes.

Key words CIM (Computer Integrated Manufacturing), flexible production, flexible assembly, assembly robot, calibration, autonomous control.

1. はじめに

従来の安価な製品を提供するための少品種大量生産方式から、近年製品に対する差別化、個性化に価値の重点が移り、多種変量生産に対応した生産技術の開発が要求されている。特に、多様化する顧客のニーズにこたえながら高効率な生産を実現するためには、CIMのもとで管理、制御される生産体制が必要となる¹⁾。例えば、今までのティーチングプレイバックロボットでは、このような生産の自動化のニーズへの対応は難しい。そこで、計算機からの数値指令によってあらゆる作業をこなす自律形のロボットと、製品の機種、生産量に応じて決まる作業内容、作業量に最適な設備の構成をとることができるフレキシブル組立センタの開発を行った^{2)~4)}。以下、本システムの内容について紹介する。

2. 技術課題と開発方針

フレキシブル組立センタのねらいは、人の思い通りに精度良く動く機械システムを開発することである。このシステムを開発するうえでの技術課題と開発方針を次に示す。

(1) 設備構成可変形の組立システム

作業内容に応じて最適な設備レイアウトを構築するために、従来からの一旦所定の場所に据え付けたならば、その場所に固定して使用していたロボットから、移動機能を付加した移動形ロボットとした。さらに、作業内容に応じて必要となるエンドエフェクタも自動的に交換させるようにした。これにより、単純な作業から複雑な作業まで、幅広く対応できるようになる。

(2) 高精度な多自由度機構

計算機からの数値指令により作業を実行可能にするために、従来からの減速機構付多関節形ロボットから、ダイレクトドライブ方式の多関節形ロボットとした。さらに、ロボット固有の機構パラメータの補正と、設備構成変更時のロボット間の相対位置関係の補正を行う。これにより、従来の繰返し精度に相当する位置決め精度が得られるようになる。

* 原稿受付 平成4年6月12日

** 正会員 (株)日立製作所 生産技術研究所
(横浜市戸塚区吉田町292)

*** 正会員 谷口工業(株)(東京都目黒区鷹番
3-24-15)

† (株)日立製作所 生産技術研究所

Fig. 1 Elements of the flexible assembly center

(3) 自律形ロボット

対象作業に応じてロボットの構成や動作が変更する。よって、環境の変化に対応可能にするために、計算機からの数値指令に基づいて動作を実行する際、センサフィードバック制御を行うことにより高精度な位置合わせを行うこととした。具体的には、力センサを用いた位置決め制御による機構パラメータの補正、視覚センサを用いた位置検出による相対位置関係の補正を行った。これにより、細かい指示はなくても自律的に高精度な位置合わせ作業が可能になる。

3. 全体構成

今回開発したプロトタイプシステムの構成を図1に示す。複数のアーム形ロボットとテーブル形ロボットおよびアーム、テーブルを平面移動させる台車、さらに部品、ハンド等をプラテンに載せて移送する自走式のフィーダから構成されている。以下、本システム構成要素について述べる。

3.1 アーム、テーブル

今回開発した多関節7自由度ロボットの構造と仕様を図2ならびに表1に示す。

多関節7自由度ロボットは、4自由度回転関節機構のアームと3自由度回転関節機構のテーブルの組合せからなる分散型で冗長自由度を持つ構成とした。

アームは、ダイレクトドライブ方式の2自由度回転関節機構と平行リンク機構からなる姿勢保持機能を持たせた位置決め機構と、アーム先端に1自由度回転機構を加えた姿勢補正機能付きの4自由度ロボットである。さらに、平行リンク機構の回転関節にかかる重力負荷に対する静的なバランスを電磁ブレーキでうける構成とした。

Fig. 2 Perspective view of a table and an arm

Table 1 Basic specifications of arm and table robots

Item	Specification	
	Arm	Table
Degrees of freedom	4 axes	3 axes
Drive system	DD and DC servo motor drive	DD servo motor drive
Operating angle	Base $\pm 160^\circ$	Roll $\pm 45^\circ$
	First arm $\pm 30^\circ$	Pitch $\pm 45^\circ$
	Second arm $\pm 145^\circ$	Yaw $\pm 150^\circ$
	Wrist $\pm 90^\circ$	
Arm length	First link 350mm	—
	Second link 350mm	—
Maximum speed	1 rps	
Absolute positioning accuracy	0.37mm	
Payload capacity	2.5kg	5.0kg
System mass	70 kg	50 kg

テーブルは、ダイレクトドライブ方式の回転関節からなり、3軸の回転中心が一点で交わる球面機構からなる姿勢決め用の3自由度ロボットである。またテーブルにも自重によるモーメント負荷を電磁ブレーキでうける構成とした。

アーム先端の回転軸を除く6軸は、すべてダイレクトドライブモータを用いて、従来位置決め精度の確保の点で問題があった、回転あるいは直動伝達機構に含まれる減速機構部のガタやロストモーションの影響を無くした。さらに、ロボット固有の機構形状を表すパラメータと、アームとテーブルの移動した場合の相対位置関係のキャリブレーションを行うことにより、位置決め精度の向上を図った。

Table 2 Basic specifications of robotic vehicle and feeder

Item	Specification	
	Robotic Vehicle	Feeder
Speed	300 mm/s	470 mm/s
Positioning accuracy	2 mm/m	0.5 mm/m
Turning angle accuracy	0.2 ' /90'	0.2 ' /90'
Payload capacity	100 kg	10 kg
Magnetic attraction	1400 N	500 N
System mass	42 kg	63 kg

Table 3 Specifications of the dynamic coupling system

Item	Specification
Payload capacity	1 kg
System mass	10 kg
Maximum load moment	
Rotation direction	5 Nm
Bending direction	4 Nm
Repeated setting accuracy	$\pm 18.5 \mu\text{m}$
Electric (signal/power) connection	Signal: 1A $\times$ 20 Power: 3A $\times$ 10
Compressed air connection	$\phi 2.0 \times 4$

Fig. 3 Diagram of dynamic coupling system

3.2 台車、フィーダ

台車、フィーダの主な仕様を表2に示す。

台車は、アーム、テーブルを搭載して平面移動することにより、設備の構成変更を行うものである。台車の構造は、2輪の独立駆動により平面内の並進及び回転運動を行う移動機構と電磁石による床面吸着固定機構からなる。

フィーダは、台車と同様の機構であるが、バッテリーとコントローラを搭載し、無線通信により平面移動する自走台車である。このフィーダの上部に部品台とハンド等のツール台を設け、組立対象部品と組立ツールを一括で配膳して供給する(図1参照)。

台車、フィーダは共に無軌道方式で数値指令に基づいてオープン制御にて移動し、アーム、テーブル、フィーダのレイアウト変更を行うものである。よって、台車、フィーダの移動精度を維持するために、あらか

じめ床面の所定位置に各々原点を設け、定期的に原点復帰動作を行わせることにより、位置決め誤差の累積を防止することとした。

3.3 動力カップリング

アーム先端部に取り付けるハンド、ツール等のエンドエフェクタを対象作業に応じて自動交換する動力カップリングの断面図と仕様を図3、表3に示す。アーム先端部に設けたアクチュエータの回転出力をオルダムカップリングを介してエンドエフェクタに伝達する構造とした。アームとエンドエフェクタの着脱は、エアシリンダ駆動力を利用したピストンと鋼球によるテーパーロック方式で、電気の動力線、信号線のプローブコンタクトおよび空気圧ポートの接続を行う。これによりエンドエフェクタの構成を簡素化でき、かつ作業内容に応じた任意の自由度を1軸分付加することができ、ハンド、ツール等の小形軽量化を実現した。

Fig. 4 Diagram of control unit

3.4 制御装置

CIM対応のシステム制御ソフトウェアを構築することから、バス仕様は32ビットのVME (Versa Module Europe) バスを採用した。ロボット制御をリアルタイムタスクOS (VMEexec) を搭載したCPUで、画像処理装置のコントロールおよびデータ処理をUNIXシステムを搭載したCPUで行い、VMEバスを介してデータ転送を行っている。全体システムで使用した4台の制御装置のうちの代表的な1台のハードウェア構成を図4に示す。

4. 高精度化

4.1 機構パラメータの補正

機構パラメータの補正は、テーブル上にあらかじめ精密に作られた位置決め点をもつ基準ジグを設置し、これにアーム先端に取り付けた位置決め用接触子のペグを位置合わせしたときのロボットの関節角から求める。ペグの作業座標に対する位置ベクトル r は、図5に示すようにアームの長さ a_{ij} 、オフセット d_i 、ねじれ角 α_{ij} 、 β_{ij} 、関節角 θ_i 、の機構パラメータからなる変数の関数であり、

$$r = f(d_0, \theta_0, a_{01}, \alpha_{01}, d_1, \theta_1, a_{12}, \alpha_{12}, \dots, d_n, \theta_n, a_{n+1}) \quad (1)$$

Fig. 5 Kinematic parameters

と表すことができる。これらの機構定数の値が誤差を持っていて、実際の値が設計値に対してわずかにずれているとし、この時ペグの位置は r に対して r' となったとする。このとき Δd_i 、 Δa_{ij} 、 $\Delta \theta_i$ 、 $\Delta \alpha_{ij}$

Fig. 6 Calibration method of kinematic parameters

Fig. 7 Target mark for visual sensing

Table 4 Design values of kinematic parameters

Kinematic pair	Length of arm	Offset	Torsion angle	Original point of articulated angle
i	$a_{ij} \text{ m}$	d_{im}	$\alpha_{ij} \text{ rad}$	$\Delta \theta_i \text{ rad}$
0	0.00000	-0.22500	-1.5707963	1.5707963
1	0.00000	0.00000	-1.5707963	1.5707963
2	0.00000	0.00000	-1.5707963	1.5707963
3	0.50000	-0.51100	3.1415927	0.0000000
4	0.00000	-0.94800	-1.5707963	-3.1415927
5	0.20000	0.00000	0.0000000	0.0000000
6	0.15000	0.00000	-1.5707963	0.0000000
7	0.35000	-0.21200	—	0.0000000

Table 5 Kinematic parameter values after calibration

Kinematic pair	Length of arm	Offset	Torsion angle	Original point of articulated angle
i	$a_{ij} \text{ m}$	d_{im}	$\alpha_{ij} \text{ rad}$	$\Delta \theta_i \text{ rad}$
0	-0.00006	-0.22607	-1.5723994	1.5721154
1	-0.00022	0.00024	-1.5711470	2.0030565
2	0.00017	-0.00063	-1.5702215	2.0234863
3	0.50346	-0.51100	3.1395906	0.0102214
4	0.00000	-0.94800	-1.5643197	-3.1379350
5	0.19905	0.00340	0.0024405	0.0327968
6	0.15056	0.00000	-1.5782272	-0.0334217
7	0.35041	-0.20623	—	0.0087097

$\Delta \theta_{i1}$ は、これらが十分に小さいとし、線形化して、

$$\Delta r = r' - r = P x \quad (2)$$

と表される。ここで、

$$x = (\Delta d_{01}, \Delta \theta_{01}, \Delta a_{01}, \Delta \alpha_{01}, \dots, \Delta d_{n1}, \Delta \theta_{n1}, \Delta a_{n1})^T \quad (3)$$

$$P = \left(\frac{\partial f}{\partial d_{01}}, \frac{\partial f}{\partial \theta_{01}}, \frac{\partial f}{\partial a_{01}}, \dots, \frac{\partial f}{\partial a_{n1}} \right) \quad (4)$$

この関係を用いて機構パラメータの誤差を推定する。

図6に示す基準ジグの基準点の位置ベクトルを $r^1, r^2, \dots, r^m$ と定める。ここで、基準ジグは平板の上にすり鉢状のテーパ穴を設けたブロックを設置したもので、この穴に先端が半球形のペグをはめ込むことで基準位置が得られるものである。位置決めはアーム先端に力センサを介してペグを取り付け、ペグがジグのテーパ穴に入ったときに、ペグに加わる力を力センサで検出しながら、テーパ穴に位置決め制御をして、ペグとジグの位置合わせを行う。この位置決めを行った

ときの対偶変位を各関節ごとに設けているエンコーダから読み取り、求めた位置を r' とする。一方、機構パラメータとして設定された設計値から、 r, P を求める。機構パラメータおよび対偶変位の値が誤差を持っていると、

$$x = (P_{n11}^T \cdot P_{n11})^{-1} \cdot P_{n11}^T \cdot \Delta r_{n11} \quad (5)$$

の関係が得られる。ここで、

$$\Delta r_{n11} = (\Delta r^{1T}, \Delta r^{2T}, \dots, \Delta r^{mT})^T \quad (6)$$

$$P_{n11} = (P_1^T, P_2^T, \dots, P_m^T) \quad (7)$$

これから、機構パラメータの設計値からのずれ量 x を推定できる。いま設計時の機構パラメータとキャリブレーション後の推定結果例を表4, 5に示す。

4.2 相対位置誤差の推定

アーム、テーブルが移動したときの相対位置誤差の推定は、アーム手先に設けたカメラにより、テーブル上の所定位置にあらかじめ設けた図7に示す基準マー

Fig. 8 Verification of positioning errors for calibration

クを検出して行う(図8参照)。この相対位置誤差補正の方法としては、平面内の位置ずれであるとして、 $x = (\Delta\theta_{0R}, \Delta a_{01R}, \Delta\theta_{1R})^T$ と置き、式(3)、(4)を変更して、カメラによる観測データで x を求め、前節の機構パラメータの補正値を更新させる。

図8に示すように、あらかじめ15点の基準マークの位置を校正した基準ジグをテーブル上に設け、アーム手先のカメラで基準マークを2カ所検出して基準ジグの位置を校正した後、残りの基準マークに位置合わせを行った結果、アームとテーブル間の位置決め精度として、数値指令に対して0.37mmを得ることができた。

5. おわりに

以上、フレキシブル組立センタの構成内容について述べた。発泡スチロール製のモデルひこうきの組立を例として、多機種のひこうきを注文に応じて、最適なロボットレイアウトにして、その場で注文されたひこうきを組み立てるプロトタイプシステムを開発した。また、ピンを穴に挿入する簡単な組立を例とした場合、5mmのピン径に対して6mmの穴への挿入が可能であることを確認し、総合の位置決め精度として、 $\pm 0.5\text{mm}$ を実現した。図9に本システムの構成例を示すように、製品の種類、生産量に合わせて、自動的に設備構成を変え、組立を実行するものである。

Fig. 9 Two system examples demonstrating the flexible assembly center

多品種化が急激に進んでいる家電製品等の混合生産ラインにおける機種切換えをはじめ、ラインレイアウトの変更が容易にできる設備として有効である。

参考文献

- 1) 松本義雄, 亀島鉦二: ヒューマンフレンドリファクトリへの提言, 日本機械学会誌, 93, 863 (1990) 29.
- 2) 宇野正人, 谷ロー郎: フレキシブル組立センタの開発(第1報), 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 545.
- 3) 谷ロー郎, 宇野正人: フレキシブル組立センタの開発(第2報), 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 547.
- 4) 宇野正人, 杉本浩一: 多関節7自由度ロボット機構, ロボティクス・メカトロニクス講演会'92講演論文集, Vol. A, 日本機械学会 (1992) 321.