

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	セル生産用軽作業マニピュレータの開発- マニピュレータの定量的性能評価-
Title	Development of a Light Duty Arm for a Cellular Manufacturing System - Quantitative Evaluation of the Performance-
著者(和文)	遠藤玄, 山田浩也, 尾形勝, 広瀬茂男
Authors	Gen Endo, Hiroya Yamada, Masaru Ogata, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	, , , 1K1-02
Citation(English)	, , , 1K1-02
発行日 / Pub. date	2009, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2009 The Robotics Society of Japan.

セル生産用軽作業マニピュレータの開発

— マニピュレータの定量的性能評価 —

遠藤玄 (東京工業大学) 山田浩也 (東京工業大学)
尾形勝 (キヤノン (株)) 広瀬茂男 (東京工業大学)

Development of a Light Duty Arm for a Cellular Manufacturing System Quantitative Evaluation of the Performance

*Gen ENDO (Tokyo Tech), Hiroya YAMADA (Tokyo Tech)
Masaru OGATA (Canon Inc.), Shigeo HIROSE (Tokyo Tech)

Abstract— This paper describes evaluation experiments of a light duty arm for a cellular manufacturing system. We measure maximum joint torque due to gravity, pose repeatability, pose stabilization time, path accuracy and standard cycle time. The results are compared with the commercially available industrial robots. The proposed arm has sufficient accuracy of pose repeatability but standard cycle time is relatively slow. Thus the results suggest that the developed arm is suitable for the task where the arm intermittently moves sharing the work with a human worker.

Key Words: Cellular Manufacturing System, Manipulator, Weight Compensation Mechanism

1. はじめに

精密電子機器の生産現場で主流であるセル生産方式において人とロボットが作業空間を共有しつつ協働して効率よく作業することを目指した軽作業用ロボットアームを筆者らは提案している [1]。Fig.1 に想定作業イメージを示す。このようなアームは人への安全性を確保するため必要アクチュエータ出力を最小化することが重要である。そのため (1) 基部に重量物を集中させる機構構成 (2) 軽量なアーム構造材 (3) 自重補償機構が採用されている。本論文では開発した試作機の性能について、静的保持トルク・位置繰り返し精度・ポーズ安定化時間・経路精度・標準サイクルタイムについて定量的に計測したのでその結果を報告する。

2. 4 節平行リンク型アーム

開発したアームの概要を解説する (Fig.2, [1])。回転する部材の慣性モーメントを極力小さくするため、構造材は CFRP を用い基部に重量物であるアクチュエータを集中配置する 4 節平行リンク構造を採用した。そしてベースリンクを旋回駆動することで空間 3 自由度

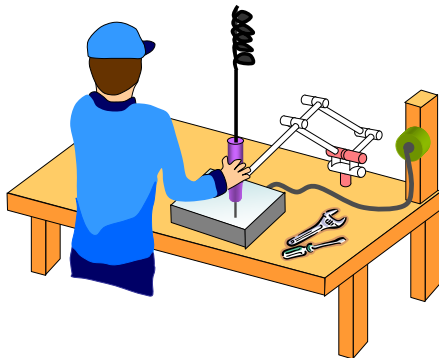


Fig.1 Concept image of a light duty arm for a cellular manufacturing system

を構成している。(座標軸を Fig.2 のように定め、原点を J_0 軸と J_1 軸の交点にとる。) 各軸は減速比 100:1 のハーモニック減速機を介した出力 20[W] の DC コアレスモータによって駆動される。平行リンク機構の J_1, J_2 駆動軸には非円形プーリとバネによる自重補償機構 [2] が導入されており、エンドエフェクタ位置に依存して変化する静的自重トルクを補償している。本報では前報のモデルに対し CFRP の薄肉化による更なる軽量化を図り、リンク部質量は 1376[g] から 981[g] とおよそ 29%減少している (なお手先部にはタスクに応じて最大 4 自由度のグリッパ機構を装備する予定であるが本報ではアーム単体の性能評価を主眼とするためダミーのアルミ部材 (230[g]) を取り付けている。)

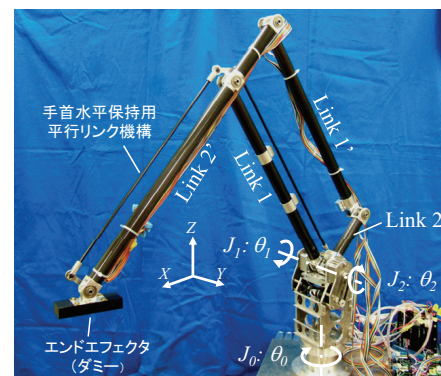


Fig.2 Prototype model of a light duty arm

アーム全長 [mm]	500(Link 1) +500(Link 2)
最大動作領域 [mm]	R=985
動作角度 [°]	$J_0: \theta_0 = \pm 180^\circ$
	$J_1: \theta_1 = 0, 90^\circ$ (ただし $\theta_1 - \theta_2 > 20^\circ$)
	$J_2: \theta_2 = -90, 0^\circ$ (ただし $\theta_1 - \theta_2 < 160^\circ$)
アクチュエータ	Maxon RE25 (20W) × 3
可搬質量 [kg]	0.5
全質量 [kg]	4.5

Fig.3 Specification

3. 制御システム

制御系はロボットのアクチュエータを制御するモータドライバと、ユーザーの操作や動作計画に基づいてモータドライバに制御指令を送る PC から構成されている (Fig.4) . モータドライバには Maxon Motor 社の EPOS 24/5 (アーム部駆動用) 3 台と将来的なエンドエフェクタ装備に備え EPOS 24/1 を 4 台使用している . EPOS はエンコーダ付きモータを指令値に応じて位置制御、力制御、速度制御することが可能であるが、本制御系では位置制御機能のみを使用する . EPOS は Vector 社の CAN インターフェイス (CANcaseXL) を介して PC と接続され、PC から EPOS には動作コマンドが、EPOS から PC にはエンコーダカウント値やモータ電流値などが送信される . 制御ソフトウェアは PC (Windows XP, Core 2 Duo 2.67GHz, メモリ 3GB) 上で Visual Studio 2005 で開発し Multi Media Timer を用いて 12[msec] 周期でアームの目標位置を指令した .

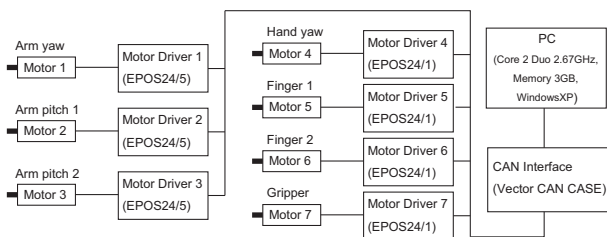


Fig.4 System configuration

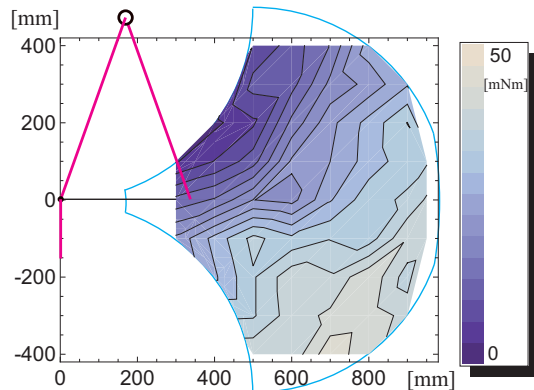


Fig.5 Required torque τ_1 without compensation

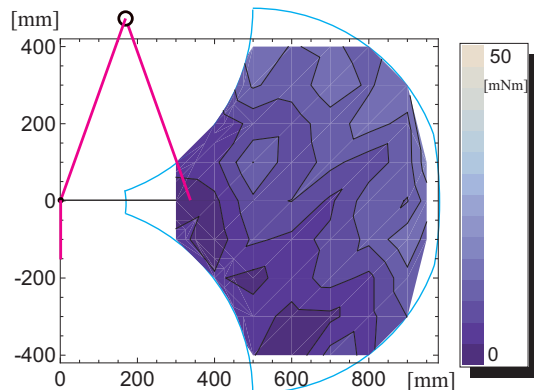


Fig.6 Required torque τ_2 without compensation

4. 評価実験

4.1 静的保持トルク測定

自重補償機構の効果を検証するため、 θ_1, θ_2 の可動範囲内で絶対空間座標で 10cm 間隔の格子点上にアーム先端位置を静止させ、その姿勢を保持するのに要するトルクの大きさをアクチュエータ電流絶対値およびトルク定数 23.4[mNm/A] から算出した .

自重補償機構がない場合のトルク分布を Fig.5, 6 に、ある場合を Fig.7, 8 に示す . 全図ともイチョウ型の外枠は可動範囲を表し、等高線は 5[mNm] ごとに図示した . リンク長の長い関節 J_1 では自重補償機構がない場合、手先位置が最大可動範囲に近づくにつれ大きな自重トルクが発生しており、その最大値は 45.6[mNm] であった (Fig.5) . アクチュエータの最大連続トルクは 26.7[mNm] であることから、このアクチュエータでは可動範囲内の半分以上の領域で姿勢が保持できないことになる . これに対し自重補償機構を導入した場合、必要最大トルクは 74% 減少し、その値は 11.7[mNm] であった (Fig.7) . よって可動範囲内すべての領域で姿勢を保持することが可能である . 同様に Fig.6, 8 より、 J_2 の最大トルク値は 17.3[mNm] から 8.2[mNm] へと 50% 以上減少することがわかった .

以上から自重補償機構が低出力アクチュエータでの静的な姿勢保持に極めて有効であることが確かめられた .

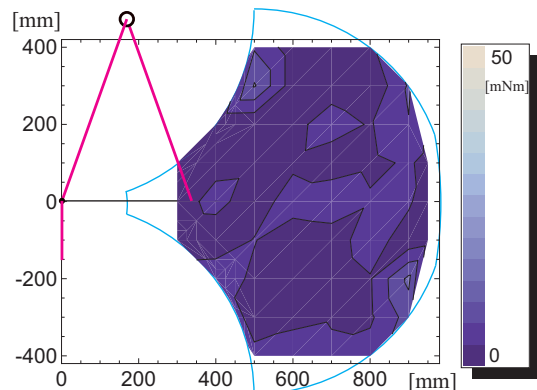


Fig.7 Required torque τ_1 with compensation

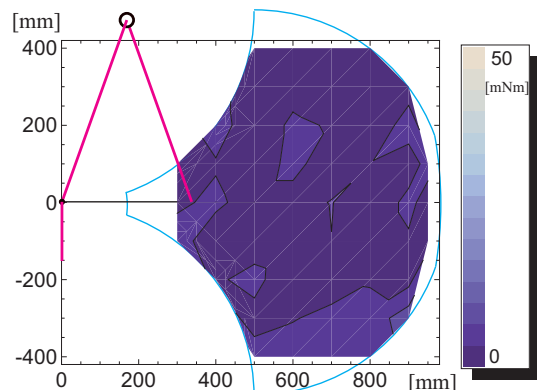


Fig.8 Required torque τ_2 with compensation

4.2 位置繰り返し精度

位置繰り返し精度とは、同じ指令ポーズに近づけたときの実現ポーズのばらつきを示す指標である。位置繰り返し精度の試験方法、算出方法は JIS B 8432 に規定されており、Fig.9 左に示すように可動範囲内の 5 点について、同じ方向から同じ指令ポーズに 30 回近づけ、実現ポーズのばらつきから算出する。アーム先端に直方体の錘を取り付け、その位置をレーザー変位計 (KEYENCE 社製 LK シリーズ) により測定した (Fig.9 右)。先端の位置の測定ではレーザーを直方体の面に垂直に当てるのが便利のため、座標軸方向は円筒座標系 (R, Z, θ) とした。ただし、測定に使用できる変位計が 2 個であったため、一回目に R 、座標と Z 座標、二回目に θ 座標というように二回に分けて位置を測定した。¹アームの可動範囲内の立方体を $(x, y, z) = (713, 0, 0)$ を中心とする一辺 $426[\text{mm}]$ の立方体とし、この中心と対角線上の 4 点の計 5 点を測定点とした。一つの測定点から他の測定点に移動させる動作を繰り返し行うことで位置繰り返し精度を求めた。

測定結果の一例を Fig.10 示す。位置繰り返し精度の導出はまず第 i 回目の試行での実現位置と、全試行の平均の実現位置との距離を l_i とする。さらに l を l_i の平均とし、 S_l を l_i の標準偏差とすると、位置繰り返し精度 RP は次式で計算される。

$$RP = l + 3S_l \quad (1)$$

この式から l_i は位置繰り返し精度 RP を半径とする球のなかにほぼ収まると言える。測定点すべてにおいて RP を算出し、その最大値を求めると位置繰り返し精度は $0.07[\text{mm}]$ であった。

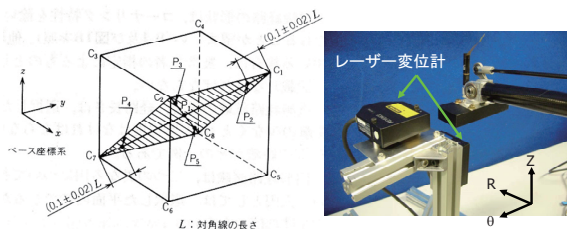


Fig.9 Measurement position for the repeatability of positioning (adopted from JIS handbook)(left), laser displacement sensor (right)

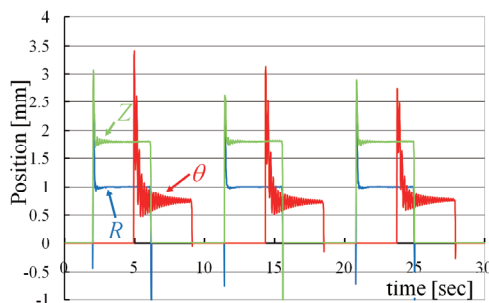


Fig.10 An example of the repeatability measurement (note: starting time for θ is arbitrary adjusted)

¹この場合、測定された実現ポーズは実際のポーズではないが、各座標のばらつき方が互いに独立であるとすれば実際に起きうるポーズであると考えられるので、この方法を採用した。

4.3 ポーズ安定化時間

ポーズ安定化時間とは、姿勢の実現を示す信号が発せられてから振動が規定値以下に収まるまでに必要な時間である。前節で述べたレーザー変位計による測定結果から、このポーズ安定化時間を求めた。ただし本実験機には姿勢の実現を示す信号を発する機能はないため、測定結果のグラフで最初の振動のピークが現れた時刻を基準時刻として、振動が $\pm 0.3[\text{mm}]$ に収まるまでの時間をポーズ安定化時間と定義した。

Fig.11 に測定結果の一例を示すが、アームの位置のうち θ 方向の振動の収束は他の方向に比べて遅く、このためポーズ安定化時間は $0.7[\text{sec}]$ となった。この値は、数秒というタクトタイムで作業を行う上では大きな問題となる数値である。このように θ 方向の振動が大きいのは、この方向がアームのリンクが張る平面に垂直な方向であり、この方向のアームの曲げ剛性が低いためである。ポーズ安定化時間を小さくするには、機構の補強、または振動を発生させない軌道計画が必要である。

4.4 経路精度

経路精度とは、指令経路に対する実現経路の偏差である。経路精度は本来は 3 次元の経路で測定すべきであるが、3 次元の位置測定は困難である。このため本報ではアームの回転軸 J_0 を使用しない 2 次元平面内での直線経路 $(x, z) = (370, 0)$ と $(x, z) = (670, 0)$ を結ぶ軌道) について、経路から外れる距離を計測して経路精度とする。格子模様を背景として動作するアームをハイスピードカメラ (nac Image Technology 社製 MEMRECAM GX-1) により撮影し、経路からの偏差を動画像から測定した。

撮影された映像の一部を Fig.12 に示す。画像を解析した結果、経路精度は以下の通りとなった。

- 往復時間 $2.0[\text{sec}]$ (平均速度 $0.3[\text{m/s}]$) の場合: $2[\text{mm}]$ 未満
- 往復時間 $1.2[\text{sec}]$ (平均速度 $0.5[\text{m/s}]$) の場合: $2[\text{mm}]$
- 往復時間 $0.8[\text{sec}]$ (平均速度 $0.8[\text{m/s}]$) の場合: $10[\text{mm}]$

アームの速度が速いほど精度が落ちるという結果となった。このため経路精度はアームの速度をどう設定するかに依存する。アームの平均速度が $0.5[\text{m/s}]$ を超えると急激に精度が落ちることから目安となる性能表示としては平均速度 $0.5[\text{m/s}]$ のとき、経路精度は $2[\text{mm}]$ であると考えられる。

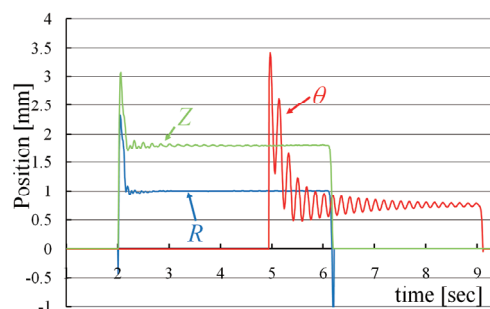


Fig.11 Measurement of the pose stabilization time (note: starting time for θ is arbitrary adjusted)

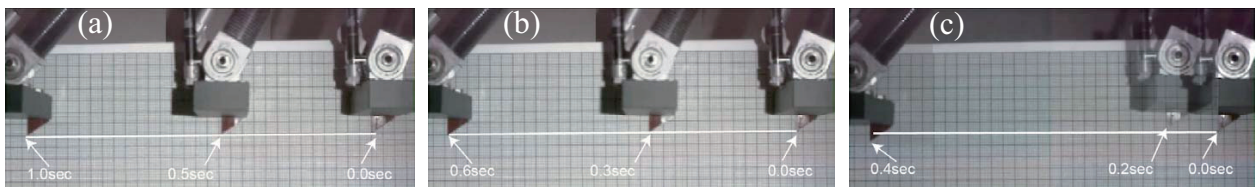


Fig.12 Trajectory tracking accuracy where periods are (a)2.0[sec], (b)1.2[sec] and (c)0.8[sec], respectively

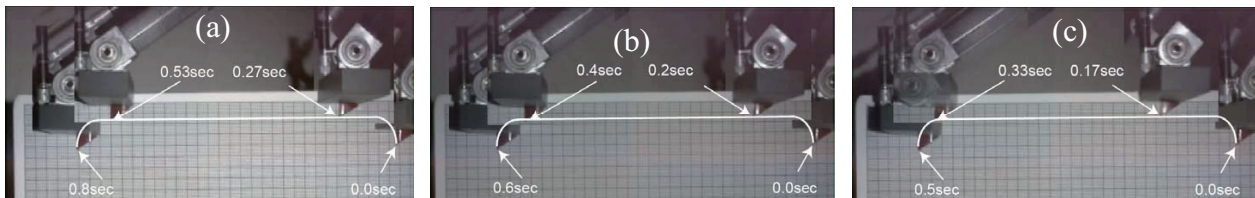


Fig.13 Measurement of the standard cycle time where periods are (a)1.6[sec], (b)1.2[sec] and (c)1.0[sec], respectively

4.5 標準サイクルタイム

標準サイクルタイムとは、アームの先端が上昇 25[mm]、水平移動 300[mm]、下降 25[mm] という経路を一往復するのに要する時間であり、アームの動作性能を示す指標である。前節と同様に手先軌道を高速カメラで撮影した (Fig.13)。アーム先端の軌道は、 $(x, z) = (500, 0)$ と $(x, z) = (800, 0)$ を z 方向に最大 25[mm] 持ち上げて接続する軌道である。

測定の結果、計画上のサイクルタイムを短くしていくと、アームが追従しきれずに経路から大きく外れる傾向が確認された。サイクルタイムと映像から確認した経路からの誤差の関係を以下に示す。

- サイクルタイム 1.6[sec] : 3[mm]
- サイクルタイム 1.2[sec] : 5[mm]
- サイクルタイム 1.0[sec] : 10[mm] 以上

この結果から、経路誤差が急激に大きくなる直前の 1.2[sec] を本アームの標準サイクルタイムとするのが妥当と考えられる。

5. 既存の産業用マニピュレータとの比較

本報で評価したアームの性能を以下にまとめる。

- 最大静的保持トルク: 11.7[mNm]
- 位置繰り返し精度: 0.07[mm]
- ポーズ安定化時間: 0.7[sec]
(振幅が ± 0.3 [mm] 以内となる時間)
- 経路精度: 2[mm]
(平均速度 0.5[m/s], 直線軌道)
- 標準サイクルタイム: 1.2[sec] (経路精度 5[mm] 以内)

ところで同程度のリーチ長を持つ現在市販されている産業用ロボット [3][4][5][6] の位置繰り返し精度・標準サイクルタイムはそれぞれ 0.02 ~ 0.5[mm], 0.3 ~ 0.5[sec] となっている。可搬重量などが異なり一概に性能の優劣を比較することは難しいが、位置繰り返し精度については本アームは既存製品と比しても十分遜色ない性能であることが分かる。一方標準サイクルタイムについては 2 ~ 3 倍もかかっており、非常に遅いことがわかる。これはそもそも低出力のアクチュエータを用いていること、アーム剛性が低いことによるものと思われる。

しかしながら既存の産業用ロボットは本体質量が 36 ~ 60[kg] もあり、またアクチュエータ出力も大きいこ

とから人と作業空間を共有することはできない [7]²。これに対して本アームは本体質量 4.5[kg] と非常に軽量で移設性に優れ、人の傍に設置することが可能である。本アームは速いタクトタイムを要求されない比較的ゆっくりとしたタスク、あるいは大きなワークスペース中で人と共同作業を行いながら間歇的に運用されるようなタスクに適すると考えられる。

6. まとめ

本報では人と作業空間を共有できる軽作業用マニピュレータについてその運動性能を評価した。その結果、自重補償機構が静止トルクの減少に大きく効果があること、十分な位置繰り返し精度があることが確かめられた。一方、長いポーズ安定化時間など機構的要因と思われる問題点も明らかになった。機構設計の工夫による比剛性の高いリンク機構や、アクチュエータ減速比の最適化、Input Shaping などによる制振制御などが今後の課題として挙げられる。

- [1] 遠藤玄, 山田浩也, 尾形勝, 広瀬茂男: “セル生産用軽作業マニピュレータの開発-非円形プーリ-バネ系による自重補償機構の効果-”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A3-05, 2008.
- [2] 遠藤玄, 広瀬茂男: “非円形プーリ-バネ系による自重補償機構パラレルリンクマニピュレータへの適用”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会論文集'08, 1A1-G20, 2008.
- [3] “産業用ロボット MELFA ラインアップ(製品情報) RV-6SD/6SDL”, http://wwwf2.mitsubishielectric.co.jp/robot/lineup/work/sd/rv6sd_01.htm
- [4] “食品・医薬品ハンドリングロボット FANUC Robot M-430iA series”, <http://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/lineup/m430ia.html>
- [5] “6 軸垂直多関節: MOTOMAN-HP3/-HP5 シリーズ”, http://www.e-mechatronics.com/product/robot/die_casting/approbot/hp3/spec.jsp
- [6] “デンソー垂直多関節ロボット VS-G シリーズ”, <http://www.denso-wave.com/ja/robot/product/latest/vsg/index.html>
- [7] “産業用ロボット - 安全要求事項 - 第 1 部: ロボット”, JIS B 8433.

² 1 軸あたり 80[W] 以上の出力を持つ産業用ロボットは柵で囲うなどして人と作業空間を分離する必要があることが規定されている