

# 力覚情報を利用した人間－機械協調運搬システムに関する研究

櫻庭 洋平, 戸羽 篤也, 畑沢 賢一, 鎌田 英博, 中村 勝男

## Study for Human and Machine Synchronized Carrying Method Applying Force Information

Yohei SAKURABA, Atsuya TOBA, Kenichi HATAZAWA,  
Hidehiro KAMATA, Katsuo NAKAMURA

### 抄 録

重量部品の運搬組立作業は作業者の身体的負担が大きいため、製造現場では高齢化に対応した負担軽減対策が求められている。本研究では、力覚情報を利用して中重量物（20～50kg）の運搬作業を支援する力覚協調運搬システムを試作した。さらに、このシステムを使用したときの人間側の運搬負荷を検証し、人間が受け持つ負荷を減少させながら軽快な動作が得られることと、従来からある運搬支援器具と同等以上の作業性が得られることを確認した。

**キーワード**：協調運搬, 負荷分担, 力覚帰還制御

### Abstract

Because of the heavy burden by carrying and assembling heavy parts, we required to the method of reduce the burden for aging workers in factories. In this study, we made a synchronized carrying method applying force information to support the carrying for little heavy work (from 20 to 50 kg) by using force information. And then, we confirm the carrying load of human side when using the system, and we can obtain the nimble action while reducing the load of human side, and we can confirm the equivalent workability by using the system to compare the previous carrying support device.

**KEY-WORDS** : Synchronized carrying, Load sharing, Force feedback control

## 1. はじめに

北海道内の製造現場で数多く見られる多品種少量生産の労働集約的な作業の中で、重さ20～50kg程度の中重量部品の運搬組立作業は作業者への身体的負担が大きいため、高齢化の進展による作業能率の低下が問題となっており、その対策が求められている。<sup>1)</sup>

これまででも、運搬作業の負荷軽減にはバランスなどの運搬補助器具の利用例がある。これらはばねの力や空気圧により運搬物の重さを一部相殺し、鉛直方向の負荷を軽減しているが、運搬物を移動した時に生じる水平方向の慣性力など重力方向以外の負荷を調節できないため、人間側の負荷軽減機能は限られている。

本研究では、ロボット制御技術を利用することで、人間側

への負荷を任意で調整できる運搬負荷軽減技術の構築を目的としている。具体的には、汎用マニピュレータロボット（以下マニピュレータ）を使用した、人間と機械による力覚協調運搬システムを試作し、これによる人間側への負荷軽減効果や従来器具と比べた作業性について検証した。

## 2. 力覚協調運搬について

力覚協調運搬とは、例えば大きな家具を複数人で同時に持って運ぶような、1個の運搬物を複数の人や機械が連携して運搬する作業のことを指す。このとき、運搬物を動かす向きや速度などの動作指令を運搬者それぞれが与える必要はなく、運搬者のうち一人（または1機械）の指令者（マスタ）が与える指令に、他の人や機械（スレーブ）は追従するだけでよ

事業名：一般試験研究

課題名：重筋作業の負担を軽減する協調ハンドリング技術の研究

い。力覚協調運搬とは、協調運搬作業の中でマスタが運搬物に与える力（力覚）の大きさや向きの変化を動作指令に利用することを指している。

本研究の協調制御システムでは、人間をマスタ、マニピュレータをスレーブとしている。これにより人間が動作の加減や判断を行い、マニピュレータは重量や慣性力などの外力を受け持ちながら、人間の動作指令に合わせて追従動作する。

### 3. 力覚協調運搬システムの試作

図1に実験装置の外観を、表1に主な使用機材の一覧を示す。対象とする作業は、工場やビルシステムで使用される配管ユニットの組立作業をモデルとし、フランジ付鋼管の運搬およびフランジ面同士の取付作業を想定した。

#### 3.1 動作原理

動作原理を図2に示す。まず人間が任意に与えた力 $f_o$ を、操作入力センサで検出する。このとき同時に、運搬物の動きで生じる慣性力や、運搬物が他の物体に接触した時の反力などの外力 $f_e$ を外力検出センサで検出し、 $f_o$ と $f_e$ から次の時間ステップ( $\Delta t$ 秒後)の位置座標を制御用PCで演算し、マニピュレータのコントローラに送信する。この一連の処理を各時間ステップ毎に繰り返し、次の動作を指令している。今回の協調運搬システムでは、時間ステップ $\Delta t$ を4msに設定した。

なお、一般的な産業用ロボットはコントローラのメモリ内に予め教示された位置座標に沿ってしか動作せず、コントローラ単独では力覚センサを含む外部信号から新たな移動先座標を計算することはできない。これに対し今回使用したマニピュレータには、制御用PCで求めた位置座標にマニピュレータを強制的に移動させるC言語命令があるため、この命令によりセンサ検出値から得られた移動先座標を時間ステップ毎にコントローラに送り、動きを再現することが可能となっている。



図1 協調運搬システム外観

表1 主要機材一覧

| 機材名            | 型番                          | 仕様   |
|----------------|-----------------------------|--|
| マニピュレータ        | FS-20N<br>(川崎重工業株)          | ・6軸垂直多関節型<br>・最大可搬重量:20kg<br>・最小時間ステップ:4ms                               |
| 操作入力用<br>力覚センサ | PD3-32-10-80N<br>(特ニッタ)     | ・検出軸:3<br>・定格負荷:80N  |
| 外力検出用<br>力覚センサ | IFS-90M31 A50-150<br>(特ニッタ) | ・検出軸:6<br>・定格負荷:200N(X・Y軸), 400N(Z軸)                                     |
| 制御用PC          |                             | ・OS:Microsoft WindowsXP Home Edition<br>・プログラム言語:Microsoft VisualC++ 6.0 |

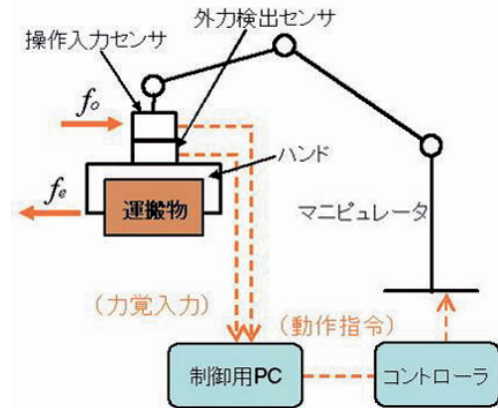
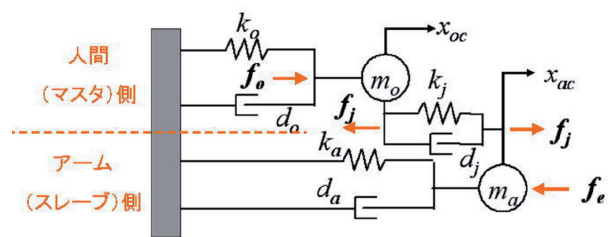


図2 信号フロー

#### 3.2 制御方式

協調運搬システムの制御には、力帰還型バイラテラル制御方式<sup>2)</sup>を使用した。制御の力学モデル、ブロック線図、運動方程式をそれぞれ図3、図4、式1に示す。この制御方式は遠隔操作アクチュエータなどで使用されており、協調運搬システムの力学モデルでは人間がマスタ、マニピュレータがスレーブとなる。



$f_o$ : 操作入力  $f_e$ : 帰還外力  $f_j$ : 連結インピーダンス  
 $k$ : 弾性係数  $d$ : 粘性係数  $m$ : 質量  
 ※添字 o: マスタ a: スレーブ c: 計算値 j: 連結インピーダンス

図3 制御モデル

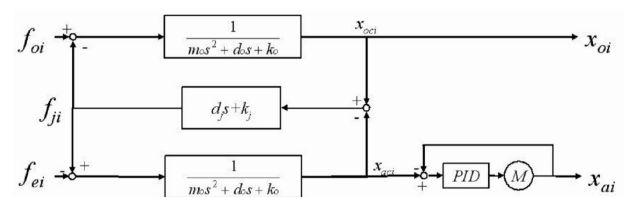


図4 ブロック線図

$$\begin{aligned}
 f_0 - f_j &= m_o \ddot{x}_{oc} + d_o \dot{x}_{oc} + k_o x_{oc} \\
 f_j - f_e &= m_a \ddot{x}_{ac} + d_a \dot{x}_{ac} + k_a x_{ac} \\
 f_j &= d_j (\dot{x}_{oc} - \dot{x}_{ac}) + k_j (x_{oc} - x_{ac})
 \end{aligned}
 \tag{式 1}$$

遠隔制御と本研究の制御との相違点は、前者ではマスタ側の装置とスレーブ側の装置とがそれぞれ別になっているが、後者では人間の操作入力から得た動作を再生するマスタ装置としての役割と、前者と同様のスレーブ装置としての役割を1アクチュエータが同時に担っている点が挙げられる。<sup>3)</sup>

動作の際には、式1のとおりマスタ側は操作入力 $f_0$ と連結インピーダンスからの反力 $f_j$ から計算上の変位： $x_{oc}$ を、スレーブ側は帰還外力 $f_e$ と $f_j$ から計算上の変位： $x_{ac}$ をそれぞれ算出する。このとき、スレーブの実際の変位： $x_a$ はモータ各軸の加減速状態やコントローラ内部の制御固有設定値、入力から動作までのむだ時間などの影響を受け、 $x_{ac}$ との変位差が生じる。これにより外力 $f_e$ も実動作 $x_a$ の影響を受けて変化するため、マスタとスレーブとの間に相対変位や相対速度が生じ、最終的に $f_j$ も変化する。

$f_j$ は相対変位や相対速度が大きくなるほどマスタ、スレーブの両方に対し大きな抵抗力となり、次のステップ以降の動きに影響を及ぼす。例えば、相対変位がほぼ一定になるように動かしていた運搬物が何かと接触して速度が急変した場合、接触反力で $f_e$ が急変するため $x_{ac}$ も急変する。このときマスタ側の計算上の位置は、接触の直前直後では急変しないが、スレーブ側の急変により相対変位と相対速度が大きいため、マスタ側でも $f_j$ による抵抗力が大きくなり、最終的には相対変位が徐々に小さくなるよう $x_{oc}$ も変化する。

また、次ステップの計算上の位置 $x_{oc}$ が得られてからも、マニピュレータの機械特性や姿勢、または安全対策機能による動作制限が加わり、実際の動作 $x_o$ は計算上の値とも異なってくる。

使用したマニピュレータには、各動作軸に時間ステップあたりの最大変位角、すなわち各軸の最大角速度が設定されている。このため、力を与え続けて加速中に、一定の速度に達した段階で強制的に等速運動に制限されてしまう。このため本システムでは、図5のように次ステップ： $i+1$ での $x_{oc}$ が動作限界を超えた場合、移動方向を維持しながら変位量を動作限界ぎりぎりの位置 $x_{oc}'$ に制限する対策を講じた。これにより動作限界を超える入力があっても協調動作を中断せずに使用可能となったが、代償として加速度を与え続けた場合にも動作限界以降は等速運動に修正されてしまい、入力に対する動作が不自然になる問題が残った。

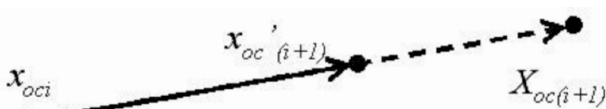


図5 角速度リミッタ対策概念図

### 3.3 協調運搬システムの操作機能

協調運搬システムの動作自由度はXYZ方向の3自由度とした。この他に、手元の操作機能として運搬物の着脱スイッチと、動作インピーダンス切替スイッチを設けた。また安全対策装備として、ISO 10218-1:2006 (JIS B 8433-1:2007) に準拠した、操作者用イネーブルスイッチおよび非常停止スイッチを設けた。(図6)

動作インピーダンス切替スイッチは、素早い移動を可能とする低インピーダンス動作と、位置の微調整がしやすい高インピーダンス動作の制御モデルに対し、2種類のインピーダンス設定値を切り替えるもので、部品のリフト作業や作業台上での移動など数m程度の運搬時には前者を、位置決め作業時には後者を切り替えて制御する。

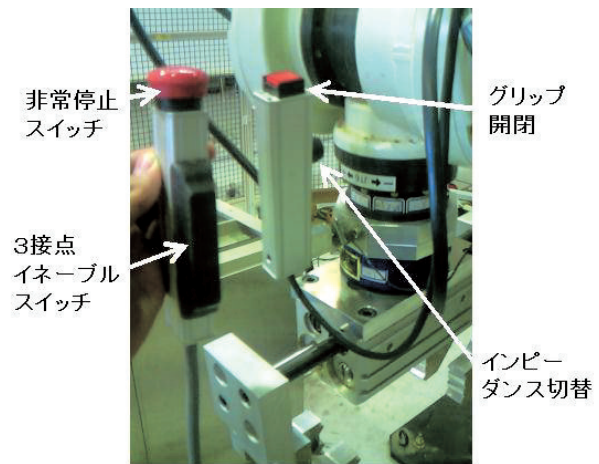


図6 手元操作スイッチ

### 3.4 運搬負荷軽減設定

協調運搬制御において、人間側が受け持つ負荷を軽減するには、運動方程式中のインピーダンス設定値を小さくして人間が感じる抵抗感を小さくする方法と、力覚センサの検出値に任意の増減幅率を乗じることで、人間が感じる負荷や入力の感覚を擬似的にコントロールする方法が考えられる。

本システムでは、表2に示す制御パラメータを加えた。このうち低インピーダンス設定については、前述のインピーダンス切替によって高速動作時の抵抗感を小さくした(①)。また、 $f_0$ に増幅率を乗じて入力を増幅して大入力と同等の動きを作り(②A)、また $f_e$ に低減率を除することで慣性力による帰還動作が過大になることを抑制した(②B)。

この他、システムの安定対策として、検出した帰還外力のうちハンド部に加わる外力を按分除去する命令を追加した(③)。これは協調運搬システムの構造上、外力検出センサが運搬物とハンドの両方の慣性力を検出するため、運搬物ではないハンド分の慣性力が過大に検出されることへの対策であり、センサ検出値のうちハンドの質量による力を理論上除去している。

表2 運搬負荷軽減命令

| 負荷軽減設定          | 目的               | 入力式  | 備考  |
|-----------------|------------------|--|---|
| ① 低インピーダンス設定    | 操作感の軽快化          | -  | ・インピーダンス切替の高速動作側で使用<br>・高速動作時は粘性: $\alpha$ および $\alpha_0$ を低速時の1/4~1/5に設定 |
| ②A $f_0$ の増幅    | "                | $f_0 = f_0 \times P$<br>$f_0$ : 演算上の入力<br>$f_0$ : 実際のセンサ検出値<br>$P$ : 増幅率                   |   |
| ②B $f_0$ の低減    | 過大な帰還外力の抑制       | $f_0 = f_0 \times 1/Q$<br>$f_0$ : 演算上の入力<br>$f_0$ : 実際のセンサ検出値<br>$Q$ : 低減率                 |   |
| ③ ハンド部慣性質量の按分除去 | 運搬物以外の慣性質量の影響を抑制 | $f_0 = f_0 \times (M_w) / (M_w + M_g)$<br>$f_0$ : 演算上の入力<br>$M_w$ : 運搬物質量<br>$M_g$ : ハンド質量 |   |

ただし、この方法では他の物体に接触した際の反力も按分除去してしまい、帰還する感覚が変わってしまう点が問題となる。この対策として運搬物と他物体との接触を検出するセンサを設ける方法も検討したが、認識判断は人間主体としてセンサ類は必要最小限の抑えるという協調運搬システムの主旨に反することや、硬質な物と接触して反対側に大きく弾かれる動きとなった場合に、按分によって反発動作を安全側に低減できるため、按分除去の命令を加えることとした。

#### 4. 機能評価

協調運搬システムの運搬負荷軽減命令の効果について実験を行い評価した。また本システムの作業性評価として、従来からある運搬補助器具で同じ作業行った作業時間と内訳を比較し評価した。

両実験ともフランジ付鋼管の運搬および取付をモデル作業とした。両実験で使用した鋼管は全て全長1mで、重さは5.9kg(50A)、10.1kg(80A)である。

#### 4.1 運搬負荷軽減効果の評価

##### 4.1.1 実験方法

運搬負荷軽減効果の評価実験は、前表2のうち操作入力増幅命令(②A)について、一定の大きさかつ入力状態の操作入力を与えた際の動作を増幅率毎に比較し、その変化から負荷軽減効果の評価することとした。なお一定入力については、人間の手で全く同じ操作入力を与えることは不可能なため、プログラム上から仮想のステップ入力を与えている。

実験ではインピーダンスを固定し、鋼管を把持した状態で鉛直上方へ10(N)、1.0秒間のステップ入力を与え、増幅率Pを変化させたときの最大変位と比較した。インピーダンス設定は表3のとおりである。なお、増幅率は1倍から段階的に高めていったが、6倍以上では振動・発散が頻発し不安定な動作となったため、安定した動作が得られた5倍で打ち切りとした。

また、評価方法については、増幅率ごとの最大移動量(m)を検出し、これを基に運搬物を1m移動させるに必要な入力

量(Ns/m)を計算し比較することで、人間が受け持つ負荷の大きさを比べることとした。

表3 固定入力実験時のインピーダンス設定

| 係数項   | 設定値 | 単位  | 係数項   | 設定値 | 単位   | 係数項   | 設定値 | 単位 |
|-------|-----|-----|-------|-----|------|-------|-----|----|
| $k_0$ | 0   | N/m | $d_0$ | 50  | Ns/m | $m_0$ | 5.9 | kg |
| $k_a$ | 0   | N/m | $d_a$ | 50  | Ns/m | $m_a$ | 5.9 | kg |
| $k_j$ | 50  | N/m | $d_j$ | 0.2 | Ns/m |       |     |    |

#### 4.1.2 実験結果・考察

図7に50A鋼管運搬時の動作を示す。動作挙動はいずれも、入力開始から0.2~0.3秒までは加速度的に移動するが、前述の角速度リミッタにより等速運動に制限され、その後粘性値により徐々に減速する。ステップ入力の終了後は、数回のオーバーシュートを経て平衡位置で静止する。このオーバーシュートについて、プログラムでの弾性設定値が  $k_0 = k_a = 0$  のため、本来ならば単純に減速するのみで減衰振動は発生しない。この原因については、マニピュレータの減速により運搬物側の振動することや、コントローラ側固有の弾性設定値が影響したことが考えられるが、原因の特定はできなかった。

図7より、ステップ入力時の最大移動量は増幅率にほぼ比例して増加していることが確認できた。また図8より、運搬物を1m移動させるのに要する入力が増幅率にほぼ反比例して減少していることを確認でき、本システムの増幅率設定により移動量や負荷を任意で調整可能なことを確認した。

ただし、増幅率が大きくなると動作が軽快になる半面、わずかな外乱でも動作に大きく影響するため、振動等が発生して不安定な動作になりやすい。実験では更なる高速動作を目指して、増幅率5倍での更なる低インピーダンス設定や、増幅率を5倍以上に高めた動作も試みたが、いずれも安定動作にはならなかった。このため、表3の設定では増幅率約5倍の設定が、安定動作の確保と人間側の負荷軽減を兼ね備えた良好な動作条件となったが、増幅率とインピーダンス設定の最適条件は、運搬物の重量や形状などで大きく変わるため、実用的には運搬物個別の調整が必要になると考えられる。

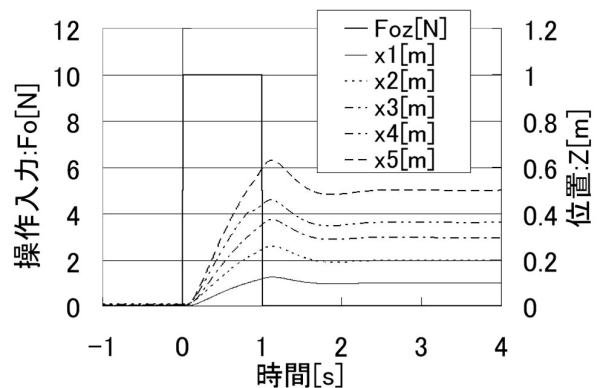


図7 ステップ入力時の増幅率別移動量 (50A)

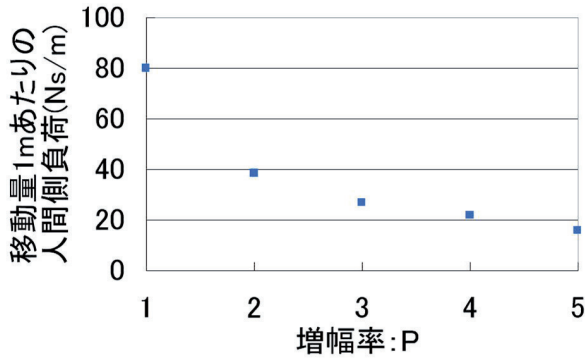


図8 1mの運搬に必要な入力負荷比較 (50A)

## 4.2 協調運搬システムの作業性評価

### 4.2.1 実験方法

作業性の評価実験は、配管部品の組立作業でよく見られる、運搬台車など床面近傍の部品置場から、上方にある取付位置まで移動し、その後に位置調整する一連の作業をモデルとした。実験は図9に示すとおり、床面付近で保持した鋼管を1.0m上方にリフトアップする鉛直移動作業(①)と、その位置にあるフランジ面での位置調整作業(②)の時間をそれぞれ計測し、前者の時間は動作開始からインピーダンス切替スイッチを高インピーダンス動作に切り替えるまで、後者の時間はフランジ面およびボルト穴の位置調整が完了して動作を停止させるまでの時間とした。

測定は、各動作条件で概ね作業速度が安定するよう練習した後に、5回の作業を繰り返した平均値で評価した。操作入力の増幅率は、予備実験で移動速度と動作の安定性のバランスから4倍とした。インピーダンス設定値については表4に示す。

また、比較実験は図10に示すワイヤスプリングバランサ(遠藤工業㈱EWF-15, 最大使用重量:15kg)を使用して同様の計測を行った。

結果の評価は、①の移動作業と②の位置調整作業を合わせて運搬作業として扱うこととし、この運搬作業全体の作業時間と、①、②個別の作業時間の比較により、効率や傾向を評価することとした。

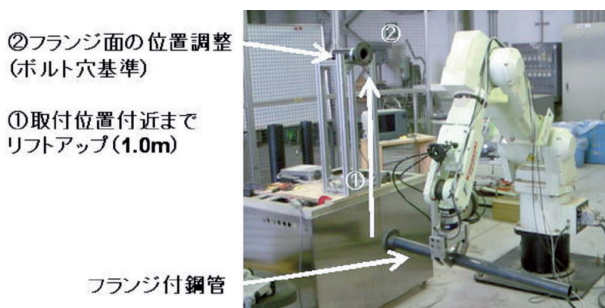


図9 作業性評価実験の概要

表4 作業性比較実験時のインピーダンス設定

| 弾性係数  |     |     | 粘性係数(高速動作時) |     |      | 粘性係数(位置調整時) |     |      |
|-------|-----|-----|-------------|-----|------|-------------|-----|------|
| 係数項   | 設定値 | 単位  | 係数項         | 設定値 | 単位   | 係数項         | 設定値 | 単位   |
| $k_a$ | 0   | N/m | $d_a$       | 80  | Ns/m | $d_a$       | 200 | Ns/m |
| $k_b$ | 0   | N/m | $d_b$       | 80  | Ns/m | $d_b$       | 200 | Ns/m |
| $k_j$ | 50  | N/m | $d_j$       | 0.2 | Ns/m | $d_j$       | 0.2 | Ns/m |



図10 従来器具による比較実験状況

### 4.2.2 実験結果・考察

図11に鋼管サイズ毎の比較実験結果を示す。実験の結果、いずれの鋼管でも①の移動時間は約1.5sとほぼ同等で、明確な効果は確認できなかった。一方、②の位置調整時間では2~3割短縮し、総合的な運搬時間では15~20%程度の時間短縮効果を確認することができた。

実験結果について、移動時間が同等であった点は、従来器具の重力キャンセル機能が協調運搬システムのインピーダンス設定と同程度に効果的であった可能性が考えられる。これに対し位置調整作業では、重力方向以外の全方位で運搬物を動かす必要があるため、重力方向以外のふらつきや慣性力を補助する機能を持たない従来器具と比べ、重力方向以外も立体的に負荷の補助が可能な協調運搬システムが優位に働いた可能性が考えられる。以上より、本システムは作業時間性能において従来器具と同等以上の能力を発揮できるものと考えられる。

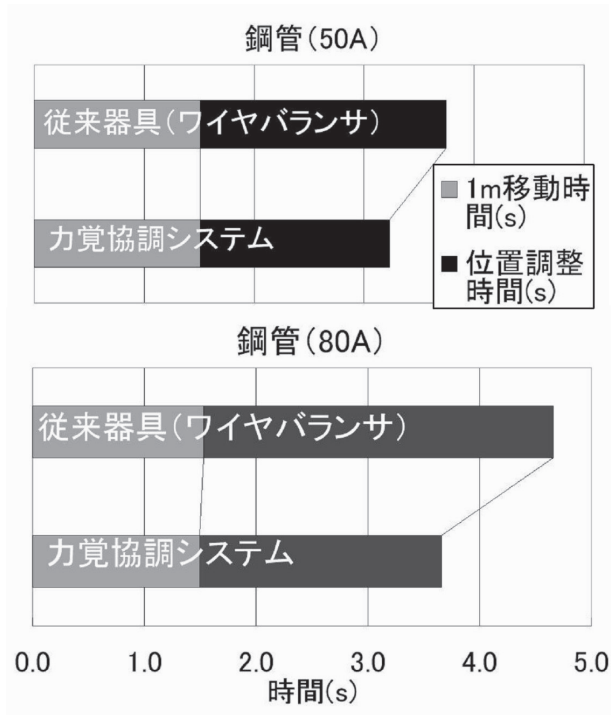


図11 従来器具との作業性比較実験

## 5. まとめと今後の展開

配管ユニット用部品の運搬組立作業をモデルとした、汎用マニピュレータロボットベースの人間-機械力覚協調運搬システムを試作し、人間側への負荷を随意に調整可能なことと、既存の運搬補助器具と同等以上の作業性を発揮できることを確認した。

本研究で得られた知見の活用法については、産業用ロボットを利用した作業システムの1アプリケーションとして、多能工セル内でのハンドリング機構への適用や、位置調整作業のみを人間の操作で行うハンドガイドアクチュエータへの適用<sup>4)</sup>をなどが考えられ、今後はこれらのアプリケーションへの適用を検討しながら、生産現場の自動化支援に活用していく予定である。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道大学大学院工学研究科の小林幸徳教授には多くの有益なご助言をいただきました。ここに心から感謝を申し上げます。

また、本研究で使用したリアルタイムロボットシステムは、競輪補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 宮崎利行ほか：高齢者の職業能力発揮サポートシステムに関する調査研究，平成12年度厚生労働省受託研究，pp.30-44，(2001)
- 2) 戸羽篤也・桑野晃希：バイラテラル方式による力覚制御技術，北海道立工業試験場報告No.297， pp.23-26，(1998)
- 3) 池浦良淳：ロボット-人間協調システムのモデリング，日本ロボット学会誌 Vol.18 No.3， pp24，(2000)
- 4) 小野一也ほか：産業用ロボットの新しい展開，IHI技報 Vol.49 No.1， pp.35，(2009)