

摩擦駆動セラミックロボットハンドの開発

(平成3年5月31日 原稿受付)

設計生産工学科 水 垣 善 夫
坂 本 正 史
浅 尾 晃 通
(現, オムロン株式会社) 野 村 幸 永

Development of Ceramic Robot Hand Driven by Friction Transmission

by Yoshio MIZUGAKI, Masafumi
SAKAMOTO, Teruyuki ASAO
and Yukinaga NOMURA

Abstract

This paper describes the development of a ceramic robot hand which is driven by friction transmission. The end-effector was designed for the use under the high temperature circumstances and made of a DC servo motor and parts of machinable ceramic which can be cut by a cemented carbide tool. To machining ceramic parts of complex shape, an adhesive was adopted and it showed enough bonding strength. The end-effector showed enough adiabatic capacity through a heat-proof test and the process of crowning the shape of wheels was effective to the friction drive. An experimental apparatus for friction drive was set up and the relationship between the contact force and the slip ratio was examined. Some remarks were obtained through the friction transmission test measuring the slip ratio and the contact force between the parts of friction drive.

1. はじめに

RISCマシンを中心としたコンピュータの急激な開発競争やその商品化により、廉価で高機能なコンピュータ環境が生産工学の分野でも広く利用できるようになってきた。ロボットなどの高機能自動化機器の開発研究においても、コンピュータを利用した制御の知能化や運動シミュレーションなどが研究されており、Computerizationに対応した生産工学のソフトウェア化が進んでいる。ソフトウェア化による高機能には、稼動・動作計画の効率化、新しい制御法の実装による操作性の向上、また状態監視・故障診断による信頼性の向上などがある。しかしながら高機能化に伴い、従来の金属材料では対策がとりにくい、高温や腐食性雰囲気などのより厳しい環

境下でもロボットの稼動が求められており、新素材をはじめとしたハードウェア開発が必須となっている。形状記憶合金¹⁾やゴムチューブ人工筋²⁾また高分子ゲル³⁾を用いたロボットハンドなど特色のある各種のハンドが開発されているが、高温環境下での実用性のあるハンドはまだ開発途上である。

ところで近年、切削加工が可能なマシナブルセラミックスが開発され、高温環境下におけるロボットハンドの開発に新たな展望が拓けている。

本研究は、高温環境下でのパーツハンドリングを対象として、マシナブルセラミックスを用いた摩擦駆動方式により2指開閉式ロボットハンドの試作を行ない、その滑りの基本特性を調べたので以下に報告する。

2. 試作

2. 1 システム概要

2指開閉式ハンドの試作に際し、以下の点を考慮した。

- ①製作の容易さを考えマシナブルセラミックスを用い、しかもこれを接着することにより試作する。
- ②駆動伝達機構はセラミックスの衝撃弱さを考え、摩擦駆動方式を用いる。
- ③セラミックス部材を多用することによりハンドの熱容量を大きくし、高温環境下での温度上昇速度を抑える。

以上の設計方針によりハンド外周のみセラミックスを用いるのではなく、駆動伝達機構も含めてセラミックスを用いることとした。その機構も歯車伝動のように折損の心配がない②の摩擦駆動方式⁴⁾とした。衝撃力が加わってもすべりが生じるだけであり、発生する熱もセラミックスにあまり影響を及ぼさないと考えたからである。なおロボットハンドによく用いられるアルミ系合金の融点に近い600℃を想定高温環境とした。

セラミックスロボットハンドを製作する上での問題点は、一般に金型を作ってセラミックスを成形する必要があることと、このようにして作った成形材を機械加工する必要があることの2点である。特に試作する場合、毎回金型を製作することは困難である。そこで本研究では切削加工可能なマシナブルセラミックスを用い、これを接着することによりロボットハンドを製作した。想定高温環境下では特殊なセラミックスを用いなくても比較的加工が容易なマシナブルセラミックスで劣悪環境に十分対処可能であると考えたからである。

以上の観点から試作した摩擦駆動セラミックスロボットハンドのシステム概要を図1に示す。またハンド組立図を図2に、その外観を写真1(a)~(c)に示す。

写真1で明らかなように、ハンド正面の熱負荷が大きいと考えられる箇所は4個の半円形扇形部品を組み合わせることにより熱遮蔽性を高めている。またDCサーボモータはパーソナルコンピュータPC9801Fにおいて位置制御のオープンループ制御により駆動した。このモータ(ハーモニックドライブシステムズ製, RH5-5502)はハーモニックドライブ内臓で定格出力1.7W, 定格トルク3.0Kg・cm, 定格速度55rpmである。指部にエンコーダなどのセンサを用いずフィードバック制御としなかった理由は、想定環境下ではセンサの熱強度に不安が

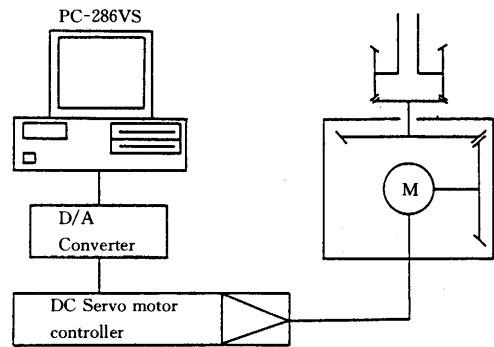


図-1 全体システム図

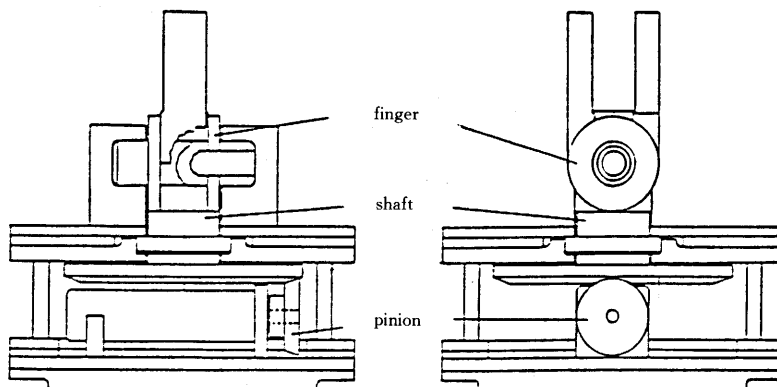


図2 組み立て図

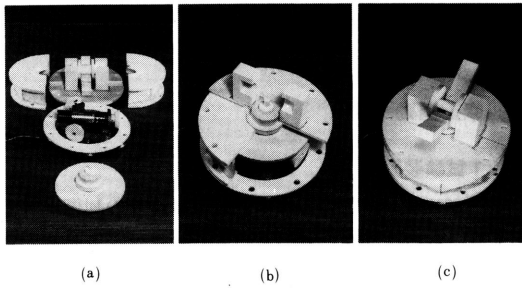


写真 1

あると考えたためである。

同様の理由で、摩擦駆動はトラクションオイルを用いない乾式である。図2でDCサーボモータに直結した摩擦車と回転軸下部端面の間、および回転軸上部端面と指部円盤摩擦車との間で2段減速しており、その減速比は各々23/60, 12/23で総減速比1/5として設計されている。回転軸下部端面は摩擦車から120°おきに配置されたその他2個の補助プーリにより3点支持されている。

なおハンドの大きさは約φ140mm, 指までの高さは約150mm, 重量は約1.76kg (モータ重量0.09kgを含む)である。

2. 2 加工・組立

使用したマシナブルセラミックス (フォトベール製・フotonセラミックス, 三井鉱山製・マセライト) の諸元を表1に示す。セラミックスは金属系材料と同等の線膨張係数であるが、熱容量が大きいため温度上昇が少なく従って熱膨張の影響を受けにくい。さらに比重もアルミニウムと同程度であり、可搬重量の小さいロボットにもエンドイフェクタとして利用可能である。欠点は加工性能の悪さと衝撃弱さであるが、マシナブルセラミックスはその加工性が改良されており、これに衝撃力に強い伝動機構を組み合わせることにより耐熱性のたかいロボットハンド製作が可能であると考えられる。マシナブルセラミックスの場合、工具寿命から超硬工具 K10が推奨されており、これによる切削条件を文献⁵⁾により表2のように選定した。なおセラミックスのみを旋盤やマシニングセンタで加工する際、チャッキング時やアップカットの突き抜け時に欠けや割れが生じるため、瞬間接着剤で真鍮などの金属片と貼り合わせて共加工を行なった。切削油は通常の水溶性を用いた。

ところで切削加工だけでは複雑形状部の加工が難しいため、単純形状部品同士の接着を行なった。使用したセ

表1 マシナブルセラミックス
CERAMICS SPECIFICATION

	PHOTON CERAMICS CO.LTD Photoveel	MITSUBI MINING CO.LTD Macente	ALUMINUM
color	White	White	Silver white
Density g/cm ³	2.64	2.56	2.70~2.80
Thermal Expansion Coefficient 1/°C	97×10 ⁻⁷	200°C 91×10 ⁻⁷ 800°C 81×10 ⁻⁷	24×10 ⁻⁶
Thermal Conductivity cal/cm·sec·°C	0.0047	0.005	0.58
Max. Working Temperature °C	1,000	1,200	660 (Dissolution)
Bending Strength kgf/cm ²	1,400	1,200	
Compressive Strength kgf/cm ²	5,000	4,500	
Tensile Strength kgf/cm ²		900	1100~1200
Modules of Direct Elasticity kgf/cm ²	6.4×10 ⁵	8.8×10 ⁵	6.89×10 ¹¹
Electric Resistance Elasticity Ω·cm	5.9×10 ¹⁵	0.7×10 ¹⁵	6.50×10 ⁻⁵
Hardness	Hs=90	Hs=86	Hv=17~23

表2 (a) 切削条件 (推奨値)
THE RECOMMENDED CONDITIONS [3]

Material (Machinable Ceramics)	High Speed Steel Tool	Cemented Carbide Tool	
		K0~K05	K10
Cutting Speed (m/min)	9~15	30~50	30~50
Feed (mm)	0.05~0.13	0.05~0.13	0.1~0.3
Depth of Cut (mm)	0.1~6		

表2 (b) 切削条件 (推奨値)
THE RECOMMENDED SHAPE OF CUTTING TOOL FOR CERAMICS

Cutting Edge name	Contour
back rake angle	-10~ 5°
side rake angle	-10~ 5°
end relief angle	5~10°
side relief angle	5~10°
end cutting edge angle	15~45°
side cutting edge angle	15~75°
nose radius	0.2~0.8mm

ラミックス用接着剤とその固化条件を表3に示す。接着強度は十分強く、振りモーメントをかけたところ接着面を横断して45°の方向に塑性破壊を示した。したがってセラミックスの単一部品と同等の強度を有すると考えられる。図3と表3にその破壊試験方法と結果を示す。

接着の問題点は接着層の厚みが固化焼結条件に左右されることであり、組立誤差を招く要因となる。試作したハンドでは組立調整機構の部品自体に接着層の厚み約0.2mmによる寸法誤差が生じていたため、指の円盤と回転軸上部端面が片当りし、一方の指の開閉が不能となった。

2. 3 耐熱試験

DC サーボモータを除き、ハンドが組み上がった状態で耐熱試験を行なった。電気炉に入れ炉内温度600℃まで加熱し1時間保持したのち炉冷したところ、部材の歪みや接触状態の変化は確認されず接着層の変色が認められたのみであった。また指の先端に850℃の鋼材を把持させ、モータ取付け部のセラミックス内壁温度を測定したものが図4である。

把持時間が短い作業においてはDC サーボモータへの

熱衝撃も小さいものと考えられ、試作したハンドの熱遮蔽性は十分高いものと考えられる。

3. 摩擦駆動試験

3. 1 試験装置

オープンループ制御の摩擦駆動では滑りの制御が重要であり、材質・機構に基づく駆動特性を調べる必要がある。試作したハンドでは組立誤差の関係で駆動せず、また接着力制御機構やセンサを内蔵していないため、図5

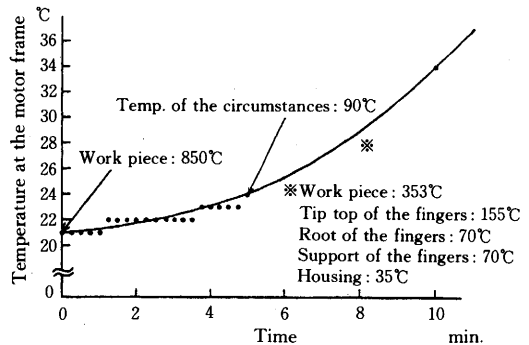


図-4 耐熱試験

表3 接着固化条件と破壊試験結果

Table 3 The results of adhesion test

Adhesive	Hardening conditions Temp.(°C)×Time(hrs)	Load f (kg)	Result
Aron ceramics	90×1+150×1	58	Break out the Ceramics itself
B-1	150×1	23	Break off on the glued surface
	250×1	19	
	400×(1/6)	17	

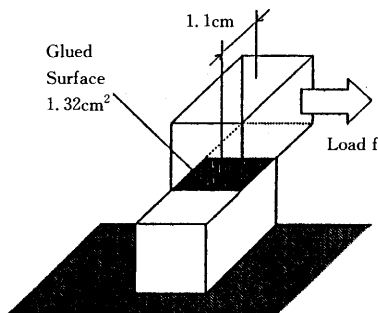
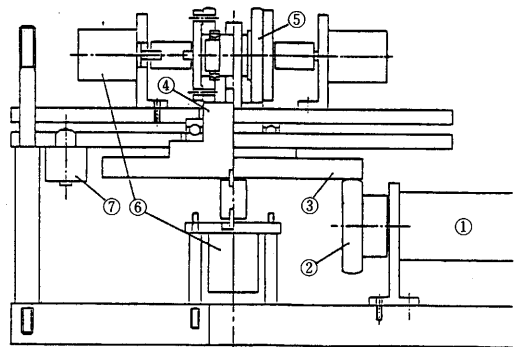


図-3 接着強度実験



- ① DC servo motor
- ② Friction wheel
- ③ Bottom face of rotor shaft
- ④ Top face of rotor shaft
- ⑤ Friction wheel of finger
- ⑥ Incremental pulse encoder
- ⑦ Linear stepping motor for pressure balancing

Fig. 5

The experimental apparatus for slip measurement

図-5 滑り実験組立図

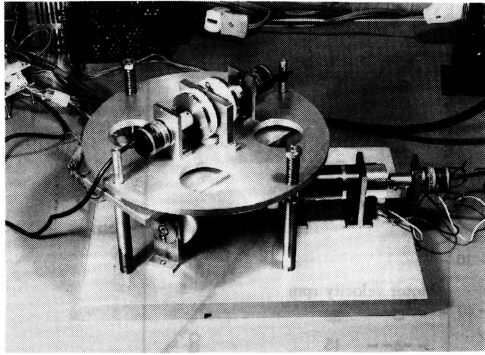


写真2 実験装置外観

および写真2に示す試験装置を別途組み立ててセラミックス摩擦駆動の実験を行なった。

試験装置では軟鋼のボルトとスプリングそれぞれにリアステッピングモータにより接触圧を調整し、摩擦車や回転軸・指部円盤に取り付けたエンコーダにより回転角を検出した。ステッピングモータ（コパル電子製、SPS20-41820）はステップ距離0.25μm、有効ストローク10mm、許容スラスト荷重5kgf以下であり、左右の指部にかかる押し付け力の調整用である。押し付け力はバネの縮み量により換算した。またロータリ・インクリメンタルエンコーダは800pulses/revをモータや回転軸に取り付けている。なおハンドの部品はこれらを取り付けられるように再加工し、回転軸摩擦駆動面はテーパ付きと平面の2種類を用意した。また駆動摩擦車はテーパ付き・円筒面およびクラウニング付きの3種類を、指部摩擦車は円筒面とクラウニング付きの2種類を用意した。

3. 2 滑り測定

当初試作したハンドでは線接触を考え、テーパ付き摩擦車とテーパ付き回転軸下部端面とした。図6は両者の回転角度の関係を表わしており、ほぼ比例しているが摩擦車の回転周期による脈動が認められる。これは接触状態が線接触ではなく組み立て誤差等の関係で接触点が周期変動する点接触となっているか、または線接触のため差動滑りが生じてstick-slipが起きていると考えられる。また円筒面による摩擦駆動を行なったが、これも指部において差動滑りを生じて指部円盤が揺動を起こした。

そこで駆動摩擦車と指部円盤にクラウニングをつけ、回転軸端面は平面として接触力と回転角の関係を求めた。図7は摩擦車の押し付け力と回転軸の滑りの関係をモ-

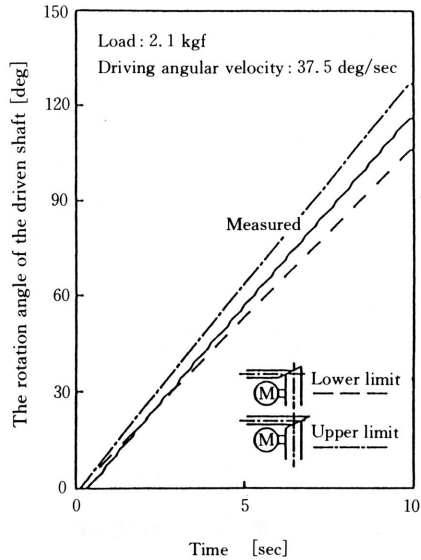


図-6 指の滑り

タの回転速度毎に測定したものである。モータの回転速度に関わらず、押し付け力と滑り率は一定の関係を有していることがうかがえる。

図7(a)において押し付け力6kgfまで滑りが増大するのは、DCサーボモータ主軸のたわみから駆動摩擦車の接触点が回転軸端面中心方向にずれるためと考えられる。したがって滑り率が見掛け上増大していることになる。またそれ以上の力がかかると接触の幾何関係は安定し、押し付け力により摩擦力が十分大きくなり滑りを減少させているものと考えられる。(駆動力となる摩擦力Fはクーロン則により

$F = \mu N$ で決まり、 μ は動摩擦係数、Nは接触面の垂直抗力である。)

(b)では押し付け力により指の滑り率がほぼ直線的に減少し負の値になっている。これは押し付け力により指部円盤の接触点が回転軸外周方向に変位し、指部が想定回転角度よりも大きく駆動されるためと考えられる。したがって見掛け上、滑り率が負と計算されることになる。

3. 3 押し付け力と駆動トルク

押し付け力を変えて、指の駆動トルクを測定した結果が図8である。ケーシングやエンコーダまた指自身の自重など押し付け力以外の実際の負荷(約1.2kgf)も考慮して換算すると、予圧と駆動トルクが比例しており、摩

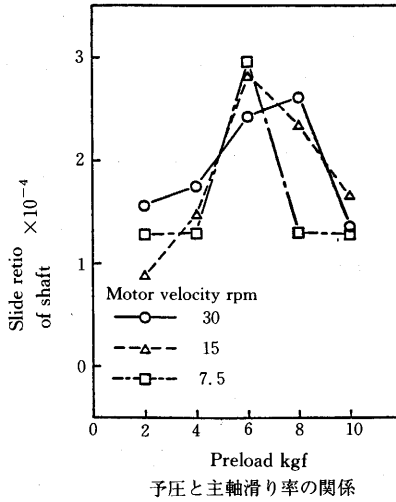


図-7(a) 予圧と主軸滑り

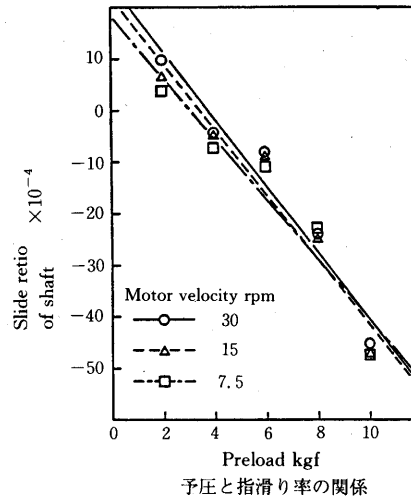
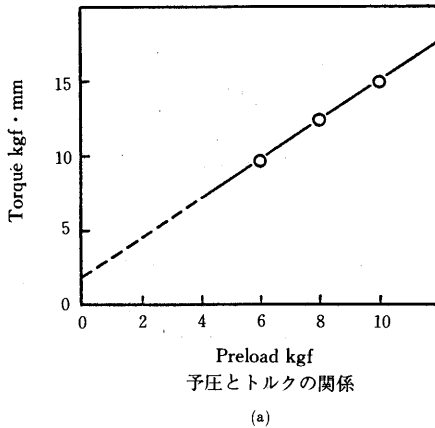
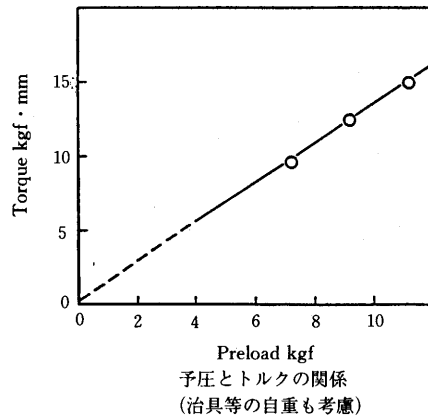


図-7(b) 予圧と指滑り



(a)



(b)

図-8 クーロン則

擦力がクーロン則に従っていることがわかる。なお実際の指部先端での把握力に換算すると約0.1kgfとなった。

さらに回転軸下部端面の駆動試験前後の表面粗さは測定したところ、試験前は $4.60 \mu\text{mRmax}$ 、試験後は $2.65 \mu\text{mRmax}$ であった。摩擦駆動により表面が少しづつなじんでいることが確認された。

4. おわりに

高温環境を想定し、摩擦駆動セラミックスロボットハ

ンドを試作した。セラミックスの加工・組立および滑り特性の実験を通じて以下の結論を得た。

1) マシナブルセラミックスの切削加工には端面での割れ・欠けを防ぐために金属を貼り合わせて行なう共加工が有効である。またセラミックス同士の接着も複雑形状部品の製作に有効である。

2) 摩擦駆動において、摩擦車にクラウニングを付けると共に軸受の配置に注意し、安定した接触状態の維持が重要である。

3) 接触状態が一定の場合、セラミックス同士の摩擦力もクーロン則に従って変化し、滑りも制御できることが確認できた。

4) 電気炉での600℃耐熱試験および高温物体把持による温度上昇試験を通じてセラミックスハンドの耐熱性を検証し、その有効性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 本間大, 三輪敬之: 形状記憶効果を利用したデジタルアクチュエータ, 日本機械学会誌, 49巻 448号, pp.2163-2169, 1983.
- 2) 吉灘裕, 山崎卓, 諏訪達徳, 成瀬俊久: ゴムチューブ型人工筋を用いた3指ハンド, 日本ロボット学会誌, 7巻5号, pp.109, 1989.
- 3) 志賀亨: 高分子ゲルを用いたロボットハンド, 日本ロボット学会誌, 7巻 5号, pp.115, 1989.
- 4) たとえば竹内芳美ほか: 摩擦駆動による精密送り装置の開発, 精密工学会誌, 56巻 1号, pp.146-151, 1990.
- 5) セラミックス加工ハンドブック, 建設産業調査会, pp.334, 1987.