

LOS MOTORES ULTRASÓNICOS Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS ORTO-PROTÉSICOS

D. Mesonero-Romanos, R. Ceres, E. Rocon y J.L. Pons
Carretera de Campo Real, Km. 0,200
La Poveda - Arganda del Rey 28500 - Madrid
dario@iai.csic.es

Resumen

Con el presente trabajo se pretende dar a conocer las propiedades que poseen los motores ultrasónicos que los hacen idóneos para ser utilizados en muchas aplicaciones en la actualidad. Entre dichas aplicaciones cabe destacar el campo de la medicina y la rehabilitación como un área en pleno apogeo en la utilización de esta nueva tecnología. Se explicará el principio de funcionamiento de estos motores así como sus principales aplicaciones. Como ejemplo de aplicación se describirá el uso de motores ultrasónicos en dos sistemas de rehabilitación: una prótesis de miembro superior y una ortesis para la cancelación de temblor patológico.

Palabras clave: Motores ultrasónicos, rehabilitación.

1 INTRODUCCIÓN

La comunidad científica se encuentra cada vez más convencida del uso de dispositivos robotizados como parte importante en la rehabilitación de pacientes. De esta forma ha aparecido la *Robótica de Rehabilitación*, dónde es frecuente encontrar robots personales utilizados como dispositivos de ayuda en numerosas aplicaciones. Básicamente se distinguen tres áreas dentro de este campo: mecanismos de soporte a la movilidad, mecanismos de rehabilitación y mecanismos de ayuda o reemplazo funcional.

Los dispositivos robóticos de rehabilitación se caracterizan por dos aspectos fundamentales [5]. Por un lado está la interacción entre el dispositivo y el hombre y por otro lado la portabilidad de los sistemas utilizados para la rehabilitación. Ambos aspectos se encuentran afectados por la tecnología de actuación utilizada. Además, dado que la portabilidad implica mejorar la autonomía de los dispositivos, se debe tener cuidado en no disminuir la eficiencia de los actuadores. Por último, y centrandose de nuevo el estudio en la portabilidad, uno de los aspectos subjetivos más relevantes y valorado por los pacientes es la estética del con-

junto y la confort. Este hecho tiene un impacto global en el sistema de rehabilitación pero en particular afecta al tamaño, al peso y lo que es más importante, al ruido de operación proporcionado por los actuadores del sistema.

Con este trabajo se pretende dar una visión general sobre los actuadores más utilizados en el área de la rehabilitación y en particular sobre los motores ultrasónicos, como una de las tecnologías adecuadas en este campo. Se explican además brevemente dos ejemplos de sistemas ortoprotésicos en los que se ha utilizado un motor ultrasónico.

2 TECNOLOGÍAS DISPONIBLES EN SISTEMAS DE REHABILITACIÓN

Los actuadores son una pieza muy importante dentro de un sistema mecatrónico. Se trata del componente principal del sistema de control del movimiento y normalmente es el que impone los límites del funcionamiento de la mayoría de sus implementaciones (precisión, tamaño, peso y rango dinámico). Estos factores se vuelven más importantes cuando se utilizan dentro del campo de la medicina y en particular en sistemas de rehabilitación.

La obtención de un buen funcionamiento de estos sistemas está relacionado con la tecnología de actuadores utilizada en estos sistemas y lleva siendo estudiada desde hace tres décadas. La falta de actuadores apropiados es la causa del limitado desarrollo aparecido hasta la actualidad de prótesis y ortesis multifuncionales avanzadas. La búsqueda de nuevos actuadores es de especial interés particularmente en el campo de la medicina. Este campo impone requerimientos rigurosos en la tecnología de actuadores a utilizar. La biocompatibilidad debe ser obligatoria, aunque también ciertos aspectos deben ser tenidos en cuenta, como la seguridad, el comportamiento robusto o la suficiente potencia de las tecnologías utilizadas. A su vez, la miniaturización debe ser considerada como un punto importante tanto para la portabilidad del sistema como para la mejora de la estética del

conjunto.

Centrando el estudio dentro del campo de la medicina y la rehabilitación, la tecnología más utilizada hasta la actualidad es la de los motores electromagnéticos [3]. Son actuadores muy estudiados y fiables que llevan siendo utilizados desde hace muchos años. Sin embargo presentan el problema de la miniaturización. Este problema se resuelve de manera satisfactoria con los motores piezoeléctricos, debido a que la piezoelectricidad se comporta correctamente al miniaturizar los actuadores hasta los niveles deseados. Además, algunas de las características de estos motores, como su nivel de fuerza, rango dinámico o desplazamiento, se ajustan perfectamente a los niveles necesarios en este tipo de aplicaciones. Dentro de este tipo de motores caben destacar los motores ultrasónicos, y en especial los motores rotativos de onda viajera. Este tipo de motores se ha convertido en la verdadera alternativa a los motores electromagnéticos, debido a sus particulares características: funcionamiento silencioso, estructura simple, elevado par a velocidad reducida, permitiendo el funcionamiento directo sin engranajes. En la figura 1 se muestra una comparativa de los motores ultrasónicos frente a los motores electromagnéticos de DC en el rango de potencia entre 1.4 y 5 W.

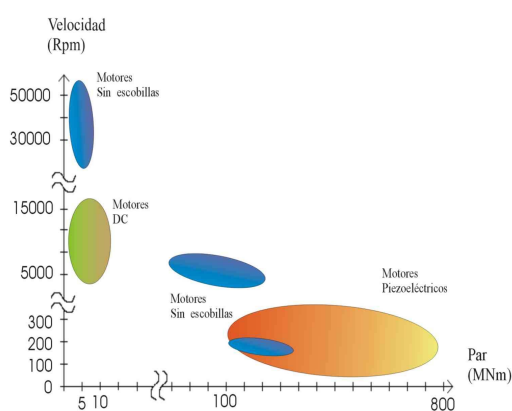


Figura 1: Comparación del rango de operación de motores ultrasónicos y motores electromagnéticos de DC dentro del rango de potencia de 1.4 a 5 W.

Otras alternativas también están siendo investigadas como sustitución a las anteriores tecnologías. Entre ellas caben destacar sistemas hidráulicos y neumáticos o nuevas aleaciones con memoria de forma (SMA). La implementación de todas estas tecnologías es potencialmente alta, siempre que se cumplan los requisitos de potencia, seguridad y comodidad necesarios en el campo de la medicina y la rehabilitación.

3 LOS MOTORES ULTRASÓNICOS

Los motores electromagnéticos fueron inventados hace más de 100 años. Y aunque estos motores son los dominantes todavía en la industria, no se puede esperar ningún cambio drástico en la mejora de su funcionamiento, a no ser que se produzca algún descubrimiento en materiales magnéticos o superconductores. Por esta razón se comenzó a prestar mayor atención a una nueva clase de motores electrocerámicos: los motores ultrasónicos. Estos motores, fabricados a partir de piezo-cerámicas, cuya eficiencia no se encuentra influenciada por su tamaño, tienen varias ventajas frente a los motores electromagnéticos. En el caso de los motores electrocerámicos la conversión de energía eléctrica a energía mecánica (ya sea de rotación o traslación) se realiza a través del efecto piezoeléctrico inverso de las electrocerámicas que llevan incorporadas estos motores.

Los motores electrocerámicos pueden ser clasificados de diversas formas. Teniendo en cuenta el tipo de excitación nos encontramos con que los motores pueden ser **resonantes** o **forzados**. La proximidad de la excitación del motor a una de las frecuencias de resonancia implica que se aprovecha la amplificación mecánica que se produce en estas frecuencias, por lo que los motores de excitación forzada obtendrán desplazamientos relativamente más bajos que los resonantes, viéndose sin embargo eximidos de los problemas que supone excitar en resonancia un motor.

La transmisión de la energía mecánica puede ser realizada de dos formas diferentes, dando lugar a una nueva clasificación de estos motores. Por un lado, la transmisión puede realizarse de forma **directa**, es decir, el desplazamiento se obtiene gracias al efecto piezoeléctrico inverso que se aplica en su totalidad y directamente a la carga. Normalmente esta transmisión se realiza en los motores de excitación forzada por lo que los movimientos que se obtienen son muy bajos, en torno a los nm o unos pocos μm . El otro tipo de transmisión se realiza por **fricción**, y principalmente se utiliza en los motores de excitación resonante. La vibración microscópica se convierte en un movimiento elíptico en el punto de contacto, transmitiéndose el movimiento por fricción. Los desplazamientos son más elevados que en el caso de la transmisión directa.

Las principales ventajas y desventajas de los motores ultrasónicos se resumen en los siguientes puntos:

- **Ventajas:**

1. Elevado par a baja velocidad.
2. Rápida respuesta, amplio rango de velocidad y buena parada, lo que proporciona una excelente controlabilidad y una resolución de posicionamiento fino.
3. Gran relación potencia por unidad de peso y moderada eficacia.
4. Funcionamiento silencioso.
5. Tamaño compacto y peso moderado.
6. Estructura simple y fácil proceso de producción.
7. No le afectan campos magnéticos externos ni los genera.
8. Eficiencia insensible a la miniaturización.

- **Desventajas:**

1. Necesitan un suministrador de potencia de alta frecuencia.
2. Bajo tiempo de vida debido a la alta fricción entre el estator y el rotor.
3. Caída en las características par-velocidad con el tiempo.

3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los motores de onda viajera están compuestos principalmente por 4 componentes (figura 2). El elemento encargado de generar las microdeformaciones a partir de un nivel de voltaje es la cerámica piezoeléctrica. Ésta se encuentra adherida a un electrodo que se encarga de transmitir las señales de excitación. Estos dos componentes se acoplan al estator, disco anular dentado y de material flexible que transmitirá el movimiento por fricción al rotor, parte móvil del motor de material ligero.

El principio de funcionamiento de los motores ultrasónicos rotativos de onda viajera es el de crear un movimiento elíptico en el punto de contacto entre rotor y estator que de lugar al movimiento del motor. Para ello se generan ondas de flexión que se propagan a través del disco anular dentado, el estator. A consecuencia de estas ondas, cada uno de los puntos sobre las caras de dicho disco describe un movimiento elíptico que se aprovecha entonces para impulsar a otro disco (el rotor) por contacto directo (figura 2).

3.2 APLICACIONES CON MOTORES ULTRASÓNICOS

Los motores piezoeléctricos son capaces de ejercer altos pares a velocidades bajas sin aplicárseles ninguna reducción mecánica, en contraste con las

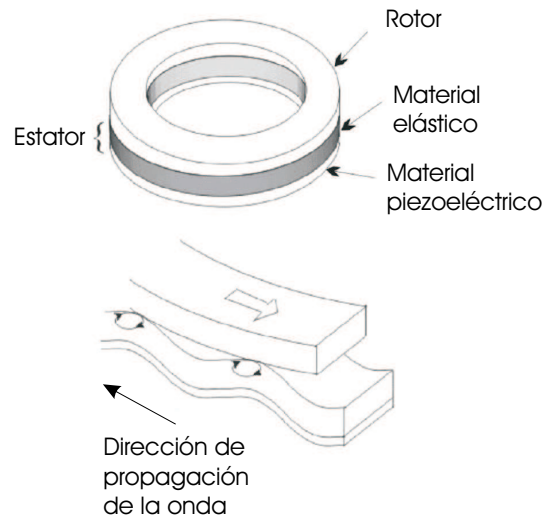


Figura 2: Componentes de un motor de onda viajera: estator, cerámica, rotor y electrodo y generacin del movimiento elptico en el punto de contacto.

altas velocidades y bajos pares que proporcionan los motores electromagnéticos. Estas características unidas a otras como, su funcionamiento silencioso, baja inercia y peso, que su eficiencia sea insensible a la miniaturización o que no les afecten campos magnéticos hacen de estos actuadores los ideales para aplicaciones relacionadas con la robótica, protésica, industria del automóvil o en aplicaciones aeroespaciales. A continuación se detallan algunas aplicaciones donde el uso de motores ultrasónicos ha sido satisfactorio:

- **Robótica:** El potencial que tienen este tipo de actuadores en robótica y protésica ha provocado el interés de muchos investigadores, debido al bajo ruido que desprenden y a la baja inercia que tienen. Schoenwald *et al.* [7] ya utilizaron en 1988 un motor ultrasónico en una mano de un robot, al igual que Ito *et al.* [2], que usaron motores ultrasónicos como actuadores de los tres grados de libertad de una mano protésica, o Pons *et al.* [4] que utilizaron este tipo de motor para realizar el movimiento de pronosupinación de la muñeca en una mano protésica en su proyecto MANUS.
- **Espacio:** En el espacio las máquinas deben operar a baja velocidad, para prevenir posibles reacciones debidas a la operación en vacío y a la ausencia de gravedad. Por este motivo Das *et al.* [1] investigaron el efecto de las bajas temperaturas y el vacío en estos motores. Además de las buenas características en cuanto a velocidad que ofrecen estos motores se une la falta de necesidad de lubri-

cación, por lo que los hacen muy aptos para su uso en aplicaciones aeroespaciales.

- **Automoción:** Es probablemente uno de los campos de aplicación que presentan un mayor potencial. Sus características de bajo ruido, ausencia de engranajes, muy buena relación par-tamaño hacen que estos motores sean idóneos para su uso en el automóvil (reposacabezas eléctricos, eleva-lunas, techos solares, etc).
- **Posicionamiento de precisión:** Debido a la ausencia de engranajes, la precisión en el posicionamiento puede ser muy elevada, por lo que son muy apropiados en dispositivos tales como los posicionadores para la fabricación de semiconductores.
- **Bienes de consumo:** Estos motores ya están siendo utilizados en diversos aparatos, como los motores de enfoque automático en algunas cámaras de fotos, cortinas automáticas para edificios o impresoras.

4 ESTUDIO DE APLICACIONES DE MOTORES ULTRASÓNICOS EN DOS SISTEMAS ORTO-PROTÉSICOS

El objetivo de las prótesis de miembro superior es el de sustituir el miembro perdido y dotar al paciente de la suficiente movilidad para realizar las tareas cotidianas de la forma más normal posible. La mano es la estructura músculo-esquelética más complicada del cuerpo humano. Cualquier movimiento puede comprender el control coordinado de más de 20 grados de libertad independientes. Si se quiere dotar a la prótesis de la misma funcionalidad, ésta deberá poseer el mayor número posible de articulaciones activas. Este hecho tiene consecuencias directas en el peso, tamaño, autonomía y requerimientos de control de la prótesis. Sin embargo el cuello de botella que se presenta en la realización de prótesis multifuncionales es la interacción prótesis-usuario, por el limitado número de comandos que se pueden generar con las señales EMG, comúnmente utilizadas en este tipo de dispositivos.

El segundo ejemplo representativo en el campo de la rehabilitación es la ortesis. Se trata de una estructura externa que acompaña al miembro afectado (no lo reemplaza) y que actúa mecánicamente en paralelo con él. Este tipo de dispositivo ha sido utilizado con frecuencia como ayuda en la marcha humana ante debilidad en los músculos del tren inferior o como supresores de temblor. De

nuevo, al ser un dispositivo portátil, se presentan los problemas de estética, comodidad y autonomía que aparecen en este tipo de dispositivos de rehabilitación.

A continuación se presentan brevemente dos aplicaciones en las que se han utilizado motores ultrasónicos en el campo de la rehabilitación.

4.1 PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR CON MOVIMIENTO DE PRONO-SUPINACIÓN

La aplicación de manos robóticas en prótesis de miembro superior ha sido un paso lógico dentro de la investigación de la manipulación artificial. El campo de la protésica requiere manos multifuncionales, lo que equivale a tener un gran número de articulaciones activas en un espacio muy reducido, a lo que se debe sumar el bajo peso y tamaño que deben tener. Además, estas prótesis necesitan complejas interfaces hombre-prótesis capaces de soportar rápidas comunicaciones bi-direccionales.

Por ello se ideó el proyecto MANUS, proyecto financiado por la Unión Europea en el marco de su programa Telematics. En MANUS se plantea el estudio, caracterización, desarrollo y aplicación de sistemas sensoriales y de actuación en el ámbito de la robótica con especial aplicación al desarrollo de ayudas técnicas para discapacitados. En el proyecto se desarrolló una prótesis robótica para amputados de miembros superiores con un alto grado de adaptabilidad (en función del grado de amputación del afectado) y con un nivel de realimentación en el agarre, introduciendo un dispositivo vibratorio que informa al usuario de las características del agarre y así poder contrastar esta información con la obtenida con el sentido de la vista.

Los objetivos que se buscan con la creación de esta prótesis son varios, todos ellos encaminados en la reducción de las necesidades insatisfechas por las anteriores prótesis:

1. Se amplían el número de tipos de agarre a cuatro: cilíndrico, precisión, lateral y gancho. Con la inclusión de estos dos tipos de agarre se llegan a cubrir hasta el 90% de las posibilidades extrínsecas de una mano humana. Además se dota a la prótesis de movimiento de pronosupinación de la muñeca.
2. Tanto los tipos de agarre como los comandos que propician el movimiento de la prótesis podrán ser modificados y adaptados a cada usuario.
3. Se ha dotado a la prótesis de un elemento vibratorio que hace las veces de realimentador

de fuerza, consiguiendo de esta manera involucrar al usuario dentro del lazo de control.

En el momento del desarrollo de la prótesis no se consiguieron obtener motores ultrasónicos comerciales lo suficientemente reducidos como para poder articular los grados de libertad de la mano. Sin embargo si pudo ser utilizado como actuador en el movimiento de pronosupinación de la muñeca. Aunque los motores ultrasónicos operan a velocidades bajas, fue necesario utilizar un sistema de engranajes para reducirla aún más. Este hecho no presentó ningún inconveniente puesto que este movimiento no necesitaba de una elevada precisión.

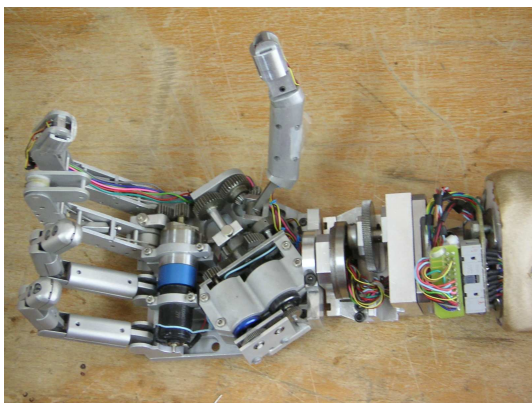


Figura 3: Detalle de la mano y la muñeca de la prótesis diseñada en el proyecto MANUS.

El prototipo fue probado y analizado tanto en pruebas de laboratorio como experimentales con pacientes en el centro CRMF de Albacete con resultados muy positivos. En la figura 3 se muestra una foto del prototipo donde se aprecia el mecanismo utilizado para el movimiento de la muñeca (en su interior se encuentra alojado el motor ultrasónico).

4.2 ORTESIS PARA CANCELACIÓN DE TEMBLOR EN MIEMBRO SUPERIOR

El temblor es una consecuencia de numerosos desórdenes neuronales. En función de estos desórdenes, se pueden encontrar temblores incontrolados tanto en miembros superiores, inferiores como en el tronco. Además, los temblores pueden ocurrir mientras el miembro se encuentre en reposo (conocido como enfermedad de Parkinson), mientras se mantiene una postura determinada (temblor esencial) o al realizar una determinada actividad. Junto con la medicación y programas de rehabilitación, el uso de cargas biomecánicas se está propugnando como un método alternativo potencialmente importante para la supresión

del temblor. La aplicación de dichas cargas puede realizarse de forma pasiva (mediante amortiguadores) o activa (utilizando actuadores) actuando mecánicamente en paralelo con el miembro afectado a través de una ortesis. En el caso de control del temblor, la ortesis debe ofrecer un amortiguamiento o aplicar una carga inercial a las articulaciones necesarias para cancelar el temblor.

El proyecto europeo DRIFTS estudia la cancelación activa del temblor en el miembro superior mediante la utilización de una ortesis con motor ultrasónico [6]. Debido a su carácter portátil, el dispositivo debe mostrar ciertas características estéticas, cosméticas y funcionales. Las dos primeras características vienen impuestas por el tamaño, peso y apariencia de la ortesis y los elementos que incluya. Al ser una ortesis activa se debe tener en cuenta los actuadores a utilizar. Según lo expuesto en el apartado 3, los motores ultrasónicos poseen las características funcionales y dimensiones para ser utilizados en esta aplicación. En la figura 4 se aprecia el aspecto de la ortesis realizada en el proyecto DRIFTS así como la utilización de un motor ultrasónico como elemento de cancelación activo.



Figura 4: Ortesis con motor ultrasónico utilizada en el proyecto DRIFTS para la cancelación activa del temblor en miembro superior.

Algunos aspectos adicionales deben ser tenidos en cuenta al utilizar un motor ultrasónico en esta aplicación. El control que se realiza del dispositivo (aplicación de la inercia o el amortiguamiento) debe realizarse siempre en lazo cerrado. El problema que presentan los motores ultrasónicos es que su salida de velocidad presenta oscilaciones repetitivas alrededor de un valor medio, lo que puede afectar al control de la ortesis. Además no debe restringirse el movimiento voluntario del usuario. Mediante el uso de la ortesis diseñada en el proyecto DRIFTS se realizaron diferentes experimentos con dos claros objetivos: comprobar el rango de controlabilidad del motor y probar el

efecto dinámico de la ortesis frente al movimiento voluntario. Los experimentos permitieron comprobar que la velocidad del motor ultrasónico puede ser controlada sin distorsiones en el rango de 0 a 5 Hz (rango de frecuencias de los temblores). En la figura 5 puede observarse como al aumentar la frecuencia hasta 8 Hz la velocidad del motor no pudo ser controlada. Por otro lado se obtuvo como conclusión que el motor ultrasónico tiene una pobre respuesta al intentar bloquear movimientos a velocidades inferiores a 0.7 rad/s, velocidad inferior a los realizados normalmente por una persona.

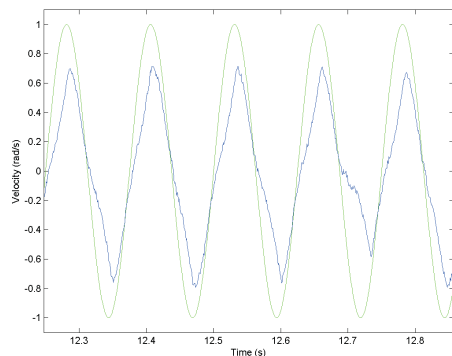


Figura 5: Respuesta del motor ultrasónico ante variaciones de frecuencia de 8 Hz.

5 CONCLUSIONES

El presente paper ha dado a conocer una de las nuevas tecnologías utilizadas en el ámbito de la medicina y de la rehabilitación. Los motores ultrasónicos, por algunas de sus características como son su funcionamiento silencioso, alto par a velocidades bajas o su tamaño compacto, los hacen ideales para ser utilizados en sistemas que cuiden la estética y comodidad dentro de sus rangos de operación. Por ello están siendo propuestos cada vez más en sistemas orto-protésicos. Dos claros ejemplos se han detallado brevemente como sistemas de rehabilitación en los que se han empleado motores ultrasónicos.

Agradecimientos

Nuestros agradecimientos expresos a la Comisión Europea por su contribución a la financiación de esta investigación a través de los contratos Manus (DE-4205) y Drifts (EU QoL QLK6-CT-2002-00536).

Referencias

[1] Das, H., Bao, X., Bar-Cohen, Y., Bonitz, R., Lindemann, R., Maimone, M., Nesnas, I. and Voorhees, C. (1999) "Robot manipulator

technologies for planetary exploration", *International Symposium on Smart Structures and Materials*

- [2] Ito, K., Nagaoka, H., Tsuji, T., Kato, A. and Ito, M. (1991) "An EMG controlled prosthetic forearm with three degrees of freedom using ultrasonic motors", *Transactions of the Japanese Society of Instrument and Control Engineers* 27(11)
- [3] Pons, J.L. and Rocon, E. (2004) "An analysis of requirements and potentials of driving technologies in medical and rehabilitation applications", *MST News* 3(04) pp 38-40
- [4] Pons, J.L., Rodríguez, H. and Ceres, R. (1999) "High mobility hand prosthesis: A mechatronic approach", *International Conference on Recent Advances in Mechatronics*
- [5] Pons, J.L., Rodríguez, H. and Rocon, E. (2004) "An evaluation of ultrasonic motors as driving technology in impedance controlled robots", *International Conference on Robotics & Automation* pp 4065-4070
- [6] Rocon, E., Ruiz, A.F. and Pons, J.L. (2004) "On the use of ultrasonic motors in orthotic rehabilitation of pathologic tremor", *Actuator* pp 387-390
- [7] Schoenwald, J.S., Beckham, P.M., Rattner, R.A., Banderlip, B. and Shi, B.E. (1988) "Exploiting solid state ultrasonic motors for robotics", *IEEE Ultrasonic Symposium*