

CONTROLE DE UMA PLATAFORMA DE STEWART ACIONADA POR CABOS

Alexandre Back e Travi, eng.travi@hotmail.com
Jorge Audrin Morgado de Gois, audrin@ime.eb.br

¹Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tiburcio, n. 80.

Resumo: Neste trabalho é feita uma breve introdução a uma plataforma de Stewart atuada por cabos, também conhecida como manipulador paralelo por baseado em tendões (MPBT). Quando empregados quatro cabos para acionar a plataforma, haverá três graus de liberdade, entretanto se for utilizado o peso da plataforma, o sistema necessita de apenas dois atuadores. Esta plataforma é acionada por motores de passo, os quais controlam os cabos que movem a plataforma através de seu espaço de trabalho. Inicialmente é discutido nesse trabalho o controle aberto do sistema.

Palavras-chave: plataforma, stewart, controle, cabos

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, manipuladores paralelos (MP), com atuadores rígidos, têm sido a base para máquinas com múltiplos graus de liberdade, onde uma das mais conhecidas é a chamada plataforma de Stewart. O interesse nestas estruturas, mostradas na Fig. 1.a, vem de sua grande rigidez e de sua grande capacidade carga quando comparadas com estruturas cinemáticas seriais. Além disso, devido ao posicionamento dos atuadores na base, eles não precisam conduzir ou suportar a massa de outros atuadores, resultando assim no manuseio de cargas pesadas com uma boa eficiência energética (Verhoeven, 1998).

A partir desta idéia, surgiram os Manipuladores Paralelos Baseados em Tendões (MPBT), também conhecidos como plataforma de Stewart por tendões e ilustrados na Fig. 1.b. Neste novo sistema tem-se uma plataforma móvel conectada a uma base fixa por cabos tensionados (chamados de tendões), ao invés de atuadores rígidos utilizados nas plataformas convencionais. Os cabos são enrolados em polias fixas à base, de modo que as únicas partes que se movem são os cabos, polias e a plataforma. Com isso tem-se uma grande economia de energia, já que a massa móvel é bem menor que a dos manipuladores paralelos. Assim o MPBT é apropriado para cargas pesadas, atingindo acelerações relativamente altas, podendo ser empregado em aplicações com grandes ou pequenas dimensões. Outros méritos deste tipo de manipulador são seu baixo peso, flexibilidade e fácil manipulação, permitindo que ele seja aplicado em diversas áreas, como construção naval, posicionamento de telescópios e sistemas de posicionamento de câmeras dentre outros, onde os MP com atuadores rígidos não poderiam ser aplicados.

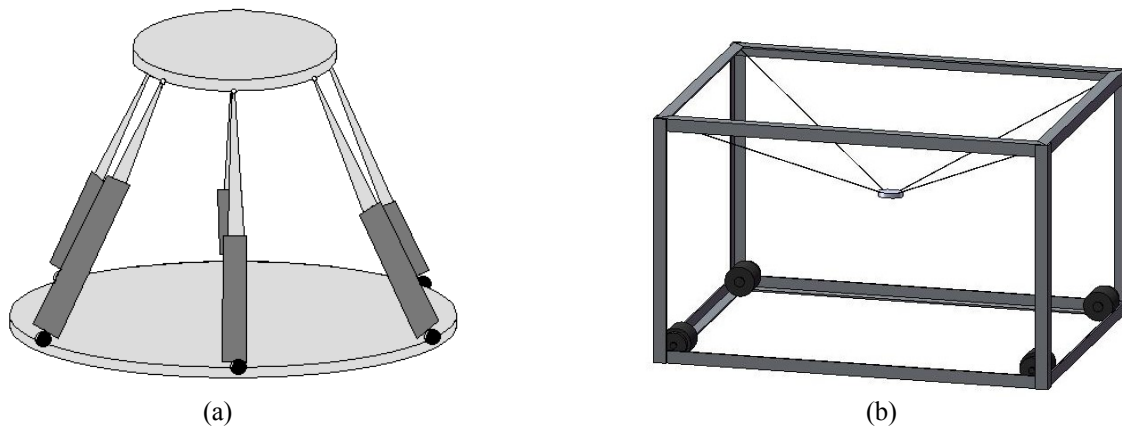


Figura 1 – (a) Manipulador Paralelo por Atuadores Rígidos; (b) Manipuladores Paralelos por Cabos Tencionados

2. PROBLEMAS

O maior problema no estudo de manipuladores paralelos em relação ao de manipuladores seriais é o cálculo da sua área de trabalho. Nos MP com atuadores rígidos, estes podem tanto puxar quanto empurrar a plataforma, tendo seu espaço de trabalho restringido por juntas articuladas. Já no MPBT, os cabos somente podem puxar, sendo seu espaço de trabalho restrito pela dinâmica do cabo, o qual pode ser somente tensionado. Em geral, o espaço de trabalho do MPBT é relativamente pequeno e depende em sua maioria da configuração geométrica (Verhoeven and Hiller, 2000).

Como os cabos podem unicamente ser puxados, é preciso $n+1$ ligações para se mover um objeto em n dimensões, surgindo algumas possíveis configurações para MPBTs.

3. CLASSIFICAÇÕES DOS MPBT

Baseado nas definições de redundância cinemática de robôs, os manipuladores paralelos baseados em tendões pode ser classificado em três tipos:

- Manipuladores Incompletos de Cinemática Restrita (MICR): neste caso o número m de cabos é menor que o número de graus de liberdade da plataforma $m < n$. A posição da plataforma não é completamente especificada cinematicamente pelo tamanho dos cabos (Maier and Woernle, 1999).
- Manipuladores Completos de Cinemática Restrita (MCCR): aqui o número de cabos satisfaz a equação $m = n$, e a posição da plataforma é cinematicamente determinada pelo tamanho dos cabos. Como o cabo pode somente puxar e não empurrar a plataforma, uma condição dinâmica adicional é necessária para posicionar a plataforma (Albus, 1992).
- Manipulador Acionado Redundantemente (MAR): neste caso o número m de cabos satisfaz a inequação $m \geq n+1$, onde o manipulador tem um acionamento redundante. A posição da plataforma é completamente definida pelo tamanho dos cabos sem a necessidade de condições dinâmicas. Um sistema com vários atuadores redundantes pode melhorar a manipulação devido à geometria de distribuição da atuação, além do que, a redundância melhora a segurança contra quebra de cabos, o que pode ser muito importante para diversas aplicações. A principal desvantagem deste método é a possível colisão dos cabos (Verhoeven, 2004).

Neste trabalho é discutido o MICR, onde quatro cabos ligam a plataforma móvel à base. Neste sistema a plataforma tem 6 graus de liberdade, tendo para isso que contar-se com a atuação do peso da plataforma. Em seguida procura-se dar uma visão geral do funcionamento do mecanismo onde é mostrada a cinemática do problema e a dinâmica.

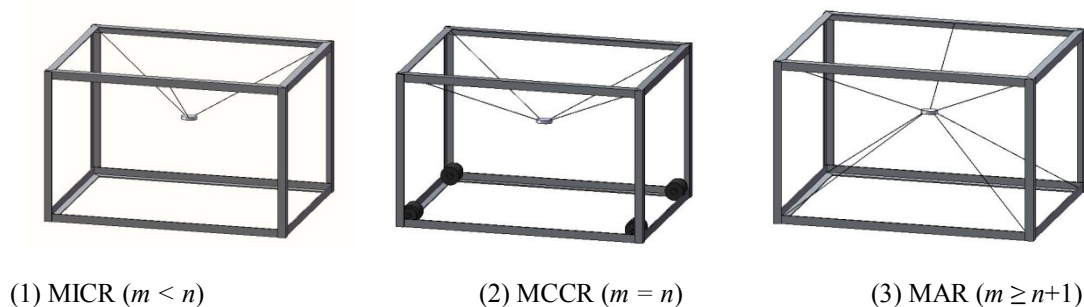


Figura 2 – Classes do MPBT

4. MODELAGEM DO MPBT

O MPBT é um mecanismo aqui caracterizado por uma plataforma diretamente conduzida por cabos. Considerando-se somente o sistema mecânico, este mecanismo pode ser tratado como um sistema multi-corpos, ou seja, constituído por corpos rígidos e juntas (Hiller and Keskeméthy, 1987, 1994). Deste modo, o MPBT pode ser tratado como um manipulador paralelo de juntas rígidas convencional, onde os cabos são modelados como juntas prismáticas.

No caso do MPBT, a força nos cabos é modelada na direção de movimento da respectiva junta prismática e sempre em um único sentido. Como o sistema de controle apresentado neste trabalho é implementado em malha aberta, ele será baseado apenas na cinemática do sistema.

5. CINEMÁTICA.

Para o MPBT, o problema cinemático compreende determinar-se a posição da plataforma e a variação dos atuadores (tamanho do cabo ou o ângulo do motor). Estritamente falando, a solução do problema cinemático retorna somente a posição da plataforma e o tamanho dos vetores representantes dos cabos. Se o cabo é tensionado, o tamanho do vetor se ajusta ao tamanho do cabo. Será considerado que o cabo estará sempre tensionado, assim pode-se tratar o cabo como um elemento rígido, assim todo o sistema é considerado um sistema multi-corpos para a solução do problema cinemático. Tanto a posição da plataforma como a dos atuadores pode ser tratada como variáveis independentes de entrada do sistema (Fang, 2004).

Considerando-se os cabos sem massa, devido seu pouco peso, a ação da gravidade sobre o cabo é ignorada neste trabalho. No caso do MPBT de grande escala, são usados cabos pesados, assim a ação da gravidade deve ser considerada. A seguir a estrutura cinemática é introduzida, então a cinemática inversa será discutida tratando-se o tamanho do cabo como atuador variável.

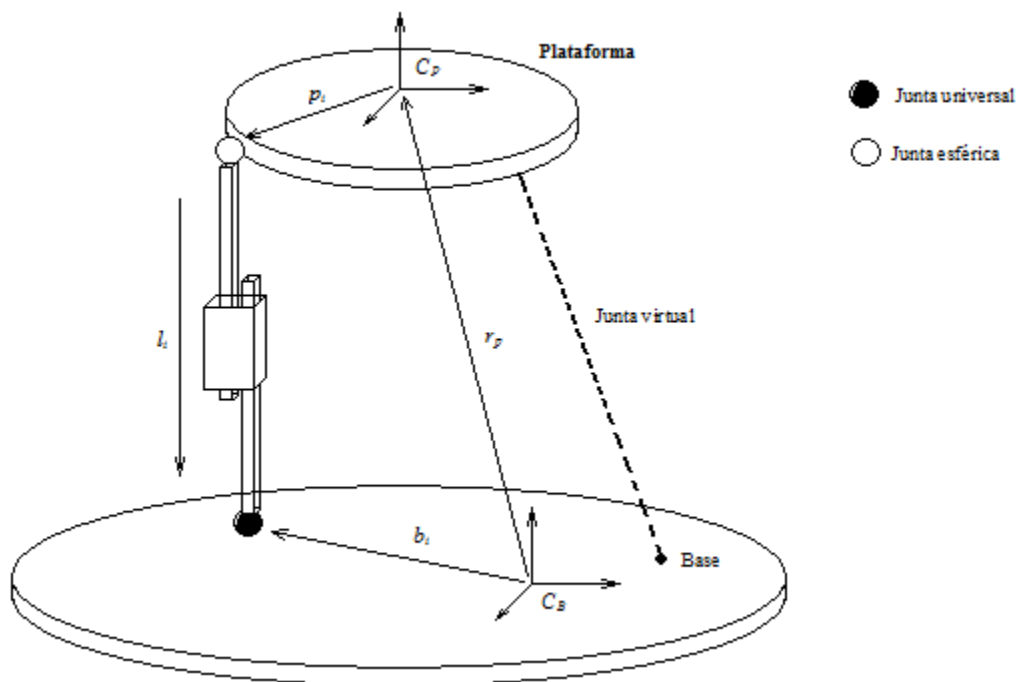


Figura 3 – Cinemática de um MBPT.

5.1. Cinemática inversa

A cinemática inversa do MPBT consiste na determinação do tamanho dos cabos ou o movimento de atuação correspondente a uma dada orientação e uma dada posição da plataforma, permitindo que o tamanho dos cabos ou o ângulo do motor seja expresso como função destas variáveis. A solução para o problema da cinemática inversa é de fundamental importância para a execução dos movimentos prescritos, a fim de que a plataforma possa se mover no espaço operacional, dentro do correspondente espaço de atuação que permite a execução do movimento desejado.

Referindo-se à Fig. 3, tem-se o referencial C_B fixado à base e outro sistema de referência C_P fixado no centro de gravidade da plataforma, sendo a sua posição em coordenadas cartesianas representada por:

(1)

A orientação da plataforma em relação à estrutura fixa é definida por ângulos cardânicos. Estes ângulos são dados pela seqüência de rotações $\theta_p = [\psi, \nu, \varphi]^T$ respectivamente em torno dos eixos Z , Y e X do referencial C_B . Assim a completa configuração do sistema pode ser dada por:

(2)

Deste modo, defini-se o problema por meio de variáveis dependentes correspondentes aos comprimentos dos cabos, os quais são descritos através de vetores \mathbf{r}_i , $i=1, \dots, m$, como mostrado a seguir:

$$\text{onde } i = 1, \dots, m. \tag{3}$$

O vetor \mathbf{p}_i é a posição do ponto de ancoragem do cabo i do cabo na base, referido no sistema global \mathbf{G} . O vetor \mathbf{p}_i^B é a posição do ponto de conexão do cabo i à plataforma, referido no sistema B . Por meio da análise do vetor pode-se facilmente obter as equações de fechamento da cadeia cinemática para determinação das coordenadas dependentes. Considerando-se os respectivos sistemas, o vetor representante dos cabos pode ser reescrito como:

$$\mathbf{p}_i^B = \mathbf{R}^B \mathbf{p}_i \tag{4}$$

A matriz de rotação \mathbf{R}^B é:

$$\mathbf{R}^B = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Então o tamanho dos i s cabos pode ser calculado pela componente i .

$$l_i = \sqrt{\mathbf{p}_i^B \cdot \mathbf{p}_i^B} \quad \text{onde } i=1, \dots, m. \tag{6}$$

Considerando a expressão acima, tem-se:

$$\tag{7}$$

A velocidade e a aceleração dos cabos são então dadas por:

$$\dot{l}_i = \mathbf{p}_i^B \cdot \dot{\mathbf{p}}_i^B \tag{8}$$

$$\ddot{l}_i = \dot{\mathbf{p}}_i^B \cdot \dot{\mathbf{p}}_i^B + \mathbf{p}_i^B \cdot \ddot{\mathbf{p}}_i^B \tag{9}$$

Com a velocidade angular da plataforma no sistema interno \mathbf{G} representada por $\boldsymbol{\omega}$, a partir da cinemática de corpo rígido vem:

$$\tag{10}$$

6. CONTROLE DA PLATAFORMA

Neste primeiro momento, construiu-se um demonstrador de tecnologia, o qual foi usado para vislumbrar a viabilidade do projeto, assim optou-se por usar motores de passo em controle de malha aberta para facilitar o primeiro projeto.

Tendo as equações cinemáticas sido programadas em MATLAB, pôde-se simular o movimento pré-definido da plataforma e adquirir os tamanhos dos cabos a cada momento da simulação. O tamanho do cabo é o parâmetro mais importante para este sistema controle, pois será a referência para os atuadores.

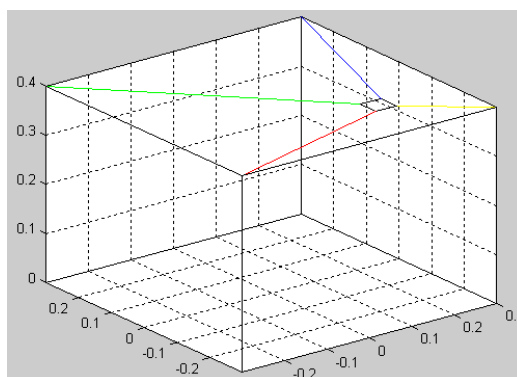


Figura 4 – Simulação no MATLAB do movimento da plataforma

6.1. Cálculo do Movimento do Motor de Passo

O programa foi elaborado para que a plataforma saia de um ponto inicial localizado no centro da base, se movimente pelo espaço de trabalho e retorne a esse mesmo ponto.

Após rodar, o programa cria um vetor de tamanhos de cabo () a cada iteração, o qual é calculado por um ΔS , ou seja, a cada deslocamento que a plataforma dá em relação ao posicionamento anterior. Com esse vetor () calcula-se a diferença entre os passos subsequentes, a fim de criar uma matriz de passos para os motores. Esta matriz é normalizada e com as dimensões das polias e as especificações do ângulo do motor, calcula-se os passos.

Tabela 1 - Saída do programa de controle dos cabos

Comprimentos dos Cabos				Passos dos Motores			
l_1	l_2	l_3	l_4	Mtr 1	Mtr 2	Mtr 3	Mtr 4
0.5510	0.5468	0.2812	0.2892	9	-30	-3	26
0.5460	0.5518	0.2909	0.2796	12	-30	-4	26
0.5406	0.5565	0.3007	0.2702	15	-31	-5	25
0.5350	0.5609	0.3105	0.2609	18	-31	-6	24
0.5291	0.5650	0.3205	0.2520	20	-31	-7	24
0.5230	0.5687	0.3305	0.2434	22	-32	-8	23
0.5165	0.5722	0.3405	0.2351	24	-32	-9	22
0.5098	0.5753	0.3505	0.2274	25	-32	-10	21
0.5028	0.5781	0.3604	0.2201	27	-32	-11	20
0.4956	0.5806	0.3703	0.2134	28	-32	-12	19
0.4881	0.5828	0.3801	0.2074	29	-32	-13	18
0.4804	0.5847	0.3898	0.2021	30	-31	-14	18
0.4724	0.5862	0.3994	0.1977	30	-31	-15	17
0.4643	0.5874	0.4088	0.1941	31	-31	-16	16
0.4559	0.5882	0.4182	0.1915	31	-30	-17	15
0.4473	0.5888	0.4273	0.1898	32	-29	-18	14

7. DRIVER'S DE CONTROLE

O sistema foi projetado para ser facilmente transportável, sendo então necessário utilizar-se um micro-controlador que tivesse uma boa quantidade de memória, de modo a armazenar as trajetórias pré-definidas da plataforma. Foi então selecionado o micro-controlador ARM7 para executar o controle geral do sistema, e como *drive* de comando para o motor de passo foi selecionado o micro-controlador PIC16fA, e para a integração do sistema foi utilizado o chip MAX485 para possibilitar uma transmissão serial em uma ligação do sistema em estrela.

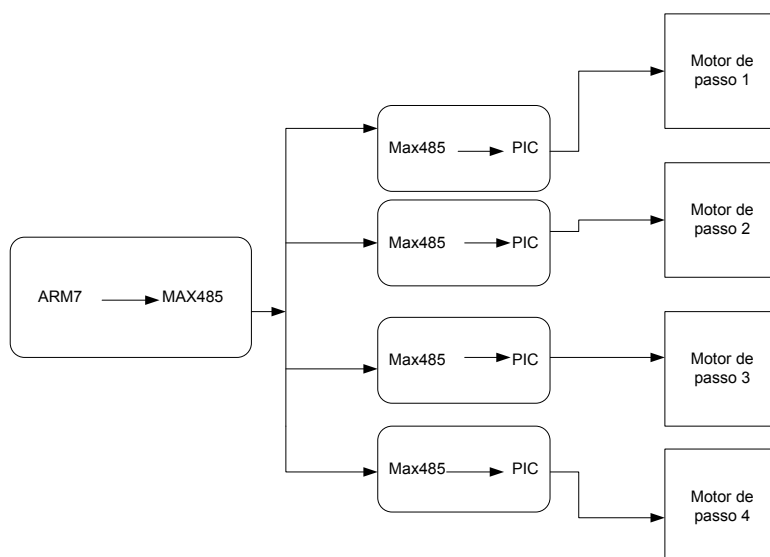


Figura 5 – Esquema de ligação dos drives de controle

7.1. ARM7

A programação do ARM7 consiste em armazenar o vetor de passos de cada motor e enviar um pacote com essas informações constantemente para o PIC. Como o *clock* de trabalho entre um processador e outro são diferentes, trabalhando o ARM7 em 54MHz e o PIC em no máximo 20MHz, foi preciso criar-se uma sub-rotina de sincronização na programação para que não houvesse perda de dados entre o ARM e o PIC. Solucionado este problema é enviado em intervalos periódico um pacote de informação.

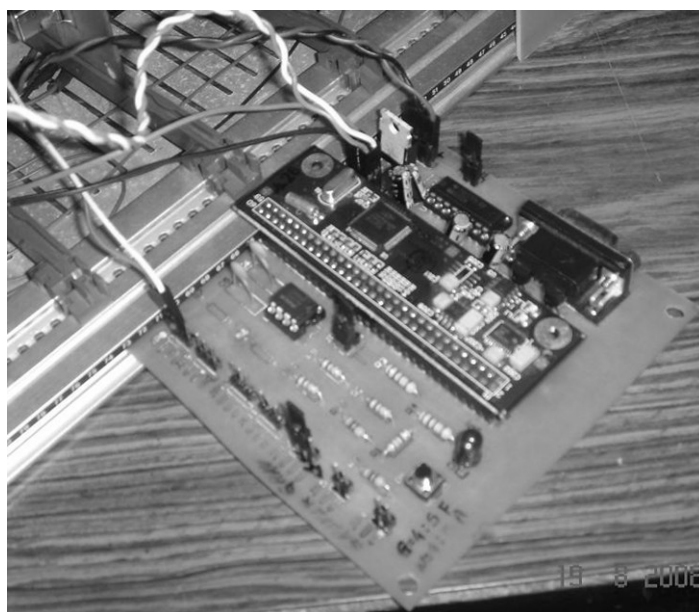


Figura 6 – Drive de controle ARM7.

7.2. PIC

A programação do PIC consiste em receber o pacote de informação do ARM e selecionar qual parte do pacote deve ser executada por ele. Com a informação selecionada, o PIC vai verificar pelo sinal recebido (positivo ou negativo) a direção em que deve rodar, puxando ou soltando o cabo. Como há 4 motores, tem-se 4 drives de controle, um para cada motor.



Figura 7 – Drive de controle PIC

O PIC também normaliza a velocidade entre os passos, a partir da quantidade de passos que cada motor deve dar, para que todos os quatro motores terminem os passos ao mesmo tempo. Por exemplo, se o motor 1 deve dar 200 passos em 1 segundo e o motor 2 somente 100 passos, este se adequa para dar os 100 passos em 1 segundo também, e isso se repete em todos os motores até o fim do pacote de dados, fazendo assim com que a plataforma execute sua trajetória.

Para maximizar o tempo entre o recebimento de um pacote de informação e outro, foi habilitado o comando de interrupção no PIC, o qual permite que o PIC receba um novo pacote de dados enquanto esta executando o pacote

anterior, assim não surgindo pausas entre os pacotes de dados, deixando a trajetória realizada mais constante e com menos vibração nos cabos.

7.3. MAX 485

O componente MAX 485 é o responsável pela ligação paralela entre o micro-controlador ARM e os PICs. A ligação em paralelo entre os micro-controladores garante que os motores iniciarão e terminarão o movimento ao mesmo tempo, evitando qualquer perda de informação durante a execução do movimento da plataforma.

8. CONCLUSÕES

Foi apresentada a Plataforma de Stewart acionada por cabos, sendo mostrados diferentes tipos de plataforma de acordo com a quantidade de graus de liberdade e acionamento.

A geometria mostrou-se fator fundamental na definição da cinemática do manipulador, sendo por vezes necessário o emprego de forçamentos para uma completa definição do movimento. A partir disto foi discutida brevemente a dinâmica da MPBT, fazendo-se uma equivalência dos cabos a atuadores rígidos.

Desenvolveu-se ainda o controle do sistema baseado em diferentes micro-controladores, sendo estes integrados por meio de protocolo de comunicação serial. Cada controlador é então sincronizando de modo a eliminar diferença de *clock* entre eles, tornando possível o controle da plataforma e a execução das trajetórias programadas.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro.

10. REFERÊNCIAS

- Albus, J. S., Bostelman, R. V. and Dagalak, N. G. (1992). The NIST ROBOCRANE, A robot Crane. *Journal of Robotic Systems*, July.
- Fang, S., 2004, "Design, Modeling and Motion control of Tendon-Based Parallel Manipulators", M. Eng. Dissertation, University Duisburg-Essen, Duisburg, Germany.
- Hiller, M. and Kecskeméthy, A. (1987). A computer-oriented approach for the automatic generation and solution of the equations of motion of complex mechanisms. *Proceedings 7th World congress Th. Mach. Mech.*, pp. 425-430. Pergamon Press, Sevilla.
- Hiller, M. and Kecskeméthy, A. (1994). Dynamics of multibody systems with minimal coordinates. *Computer-Aided Analysis of Rigid and Flexible Mechanical Systems*, vol. 268 of NATO ASI Series E: Applied Sciences, pp. 61-100. Kluwer Academic Publishers.
- Maier, T. and Woernle, C. (1999). Flatness-based control of underconstrained cable suspension manipulators. In *proceedings of DETC'99, 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*. September 12-15, Las Vegas, Nevada, USA.
- Verhoeven R. and Hiller M., 2002, "Tension distribution in tendon-based stewart platforms," in *Proc. 8th Int. Symp. Advances Robot Kinematics*, Caldes de Malavella, Spain.
- Verhoeven, R., Hiller, M., and Tadokoro, S., 1998, "Workspace, stiffness, singularities and classification of tendon-driven Stewart Platforms", *Advances in Robot Kinematics: Analysis And Control*, pages 105-114, Austria.
- Verhoeven, R. and Hiller, M., 2003, "Tension Distribution in Tendon-Based Stewart Platforms", In *Proceedings of the ARK '02 "8th, International Symposium on Advances in Robot Kinematics"*, Caldes de Malavella, Spain, pp. 117-124.
- Verhoeven, R., 2004, "Analysis of the workspace of Tendon-Based Stewart-Platforms. Ph. D. dissertation, University Duisburg-Essen, Duisburg, Germany.

11. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.