



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
DEMEGI
Secção de Automação, Instrumentação e Controlo
SAIC

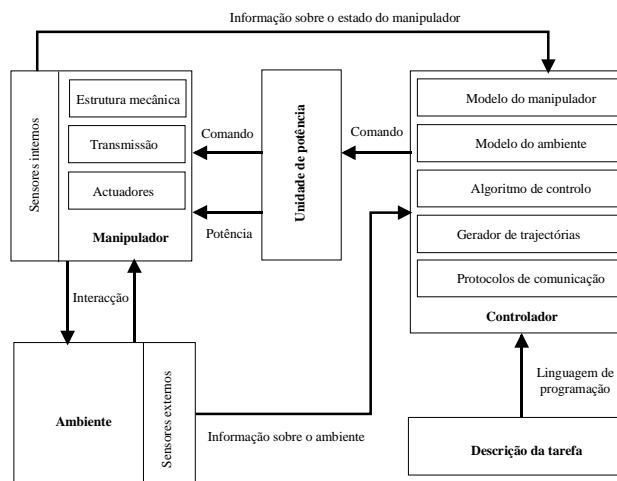
António Mendes Lopes
FEUP, 2002

Manipuladores de Estrutura Paralela



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Manipulador Robótico *Elementos funcionais principais*



- Dispositivo mecanicamente concebido para posicionar e orientar no espaço o seu órgão terminal: uma **garra** ou uma **ferramenta**

Manipulador Robótico

Elementos funcionais principais

- **Manipulador** - conjunto de corpos ligados por juntas, formando cadeias cinemáticas que definem uma estrutura mecânica
 - No manipulador incluem-se os actuadores, que agem sobre a estrutura mecânica, modificando a sua configuração, e a transmissão, que liga os actuadores à estrutura mecânica
 - Os termos manipulador e robô são muitas vezes usados com a mesma finalidade, embora, formalmente, tal não esteja correcto

- **Sensores** - dispositivos usados para recolher e proporcionar ao controlador informação sobre o estado do manipulador e do ambiente
 - Os sensores internos fornecem informação sobre o estado do manipulador (por exemplo, posição, velocidade ou aceleração)
 - Os sensores externos fornecem informação sobre o ambiente (por exemplo, sensores de força/momento ou câmaras de vídeo para detecção de obstáculos)

Manipulador Robótico

Elementos funcionais principais

- **Controlador** - dispositivo, tipicamente baseado em microcomputador, que controla o movimento do manipulador
 - Usa os modelos do manipulador e do ambiente e a informação fornecida pelo operador e pelos sensores
 - Efectua as operações algébricas de cálculo necessárias
 - Envia os sinais de controlo aos actuadores
 - Poderá ainda efectuar tarefas como o registo de dados em memória e a gestão das comunicações com o operador ou com outros dispositivos que cooperem com o robô na execução da tarefa

- **Unidade de Potência** - dispositivo que tem por objectivo proporcionar energia aos actuadores
 - Num sistema actuado electricamente trata-se de um conjunto de amplificadores de potência

Robô Industrial

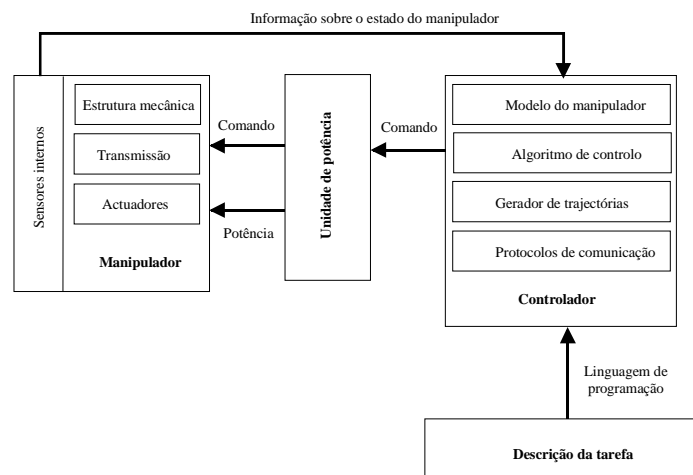
Elementos funcionais principais

- A interacção com o ambiente é praticamente inexistente
- A programação do robô baseia-se numa descrição imutável quer da tarefa quer do ambiente
- O manipulador é, normalmente, constituído por um conjunto de corpos rígidos ligados em série por intermédio de juntas rotativas ou prismáticas
- Uma das extremidades do manipulador encontra-se rigidamente ligada a uma base, enquanto que a extremidade oposta suporta o órgão terminal, podendo mover-se livremente no espaço
- Tipicamente, o manipulador possui 6 graus de liberdade (gdl) e é composto pelo braço e pelo punho. O braço tem, em geral, 3 gdl, efectuando o posicionamento do punho. Este, normalmente, é composto por 3 juntas rotativas, que utiliza para orientar o órgão terminal
- Em geral, o subsistema controlador utiliza algoritmos de controlo de posição. Controladores descentralizados, de ganhos fixos, em que cada junta possui o seu próprio servo-sistema de controlo. Apresentam um desempenho satisfatório graças às transmissões mecânicas empregues, com factores de redução da ordem dos 100:1

5

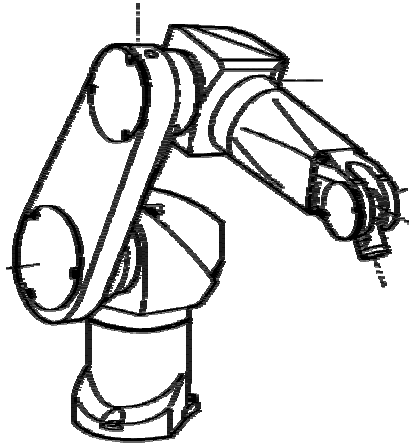
Robô Industrial

Elementos funcionais principais

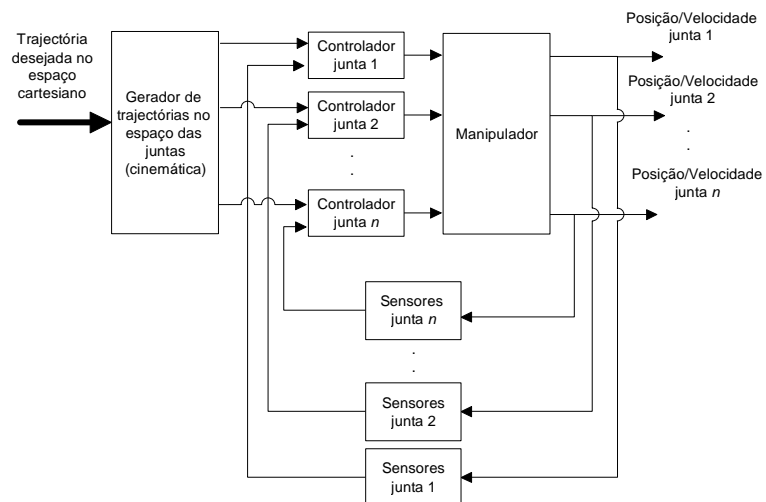


6

Manipulador Industrial *Estrutura clássica*



Robô Industrial *Controlador*



Robô Industrial ***Controlador***

- Estratégias adequadas para tarefas que envolvem exclusivamente o movimento do manipulador em espaço livre, ou envolvem uma fraca interação entre o manipulador e o ambiente
 - Transferência de materiais, pintura por “spray”, soldadura por pontos ou paletização

- Estratégias não adequadas para tarefas que requerem uma forte interação entre o manipulador e o seu ambiente
 - Montagem de componentes, o seguimento de contornos necessário às operações de polimento, de rebarbagem e de rectificação e, em geral, aplicações médicas de assistência cirúrgica

Robô Industrial ***Controlador***

- Limitações impostas pelo subsistema de controlo *de posição* e pela estrutura mecânica *em série*
 - São necessárias estratégias de controlo que confirmem ao manipulador uma *certa* capacidade de adaptação e acomodação às forças de contacto
 - Mas, nenhuma estratégia de controlo pode garantir um bom desempenho do sistema robótico se o seu subsistema manipulador for desadequado à aplicação em causa

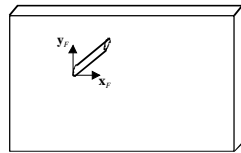
- Numa estrutura mecânica em série cada elo da estrutura suporta os elos seguintes (e, muitas vezes, os respectivos motores). Por conseguinte, são necessários motores de elevado binário e elos robustos, ambos, necessariamente, mais pesados

- A elevada massa em movimento limita a capacidade dinâmica do robô industrial. Independentemente do controlador, a reduzida largura de banda característica dos robôs de estrutura em série compromete a sua aplicabilidade para tarefas que envolvam o controlo activo das forças de interação entre o manipulador e o ambiente

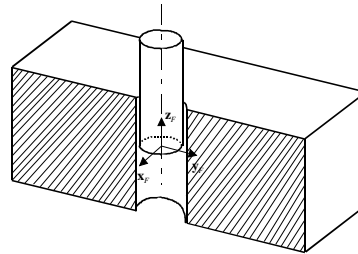
Robô Industrial

Tarefas que envolvem contacto físico

- Tarefas que envolvem contacto físico



(a)



(b)

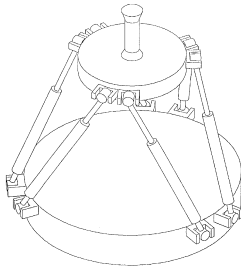
Manipulador de Estrutura Paralela

Uma definição

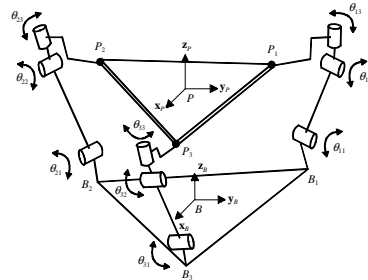
- Um manipulador de estrutura paralela é formado por duas plataformas, uma fixa (base) e uma móvel (plataforma móvel), ligadas entre si por duas ou mais cadeias cinemáticas abertas e independentes
- A estrutura é dita *plenamente paralela* se, em cada cadeia cinemática, somente uma junta é actuada (junta activa)
 - Uma estrutura com n gdl terá n cadeias cinemáticas
- A estrutura é dita *paralela híbrida* (ou *paralela*) se existir pelo menos uma cadeia cinemática com mais do que uma junta activa. Uma estrutura com n gdl terá $m < n$ cadeias cinemáticas
 - Não confundir uma estrutura *paralela híbrida* com uma estrutura *híbrida* formada por uma sub-estrutura paralela e uma sub-estrutura em série

Manipulador de Estrutura Paralela

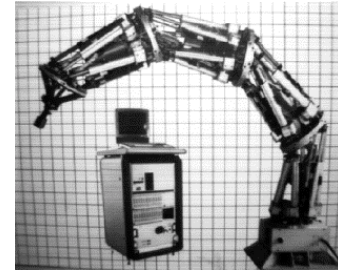
Exemplos esquemáticos



Plenamente Paralela



Paralela Híbrida



Híbrida

13

Estrutura Paralela vs Estrutura em série

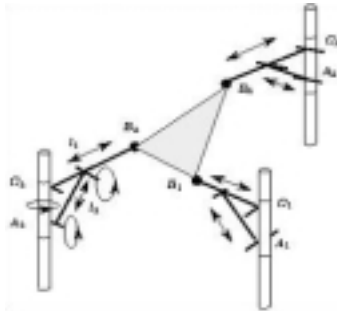
- **Estrutura em paralelo** - boa capacidade de posicionamento, elevada capacidade de carga, grande rigidez estrutural, grande compacidade, baixa inércia, elevada largura de banda e reduzido espaço de trabalho
- **Estrutura em série** - fraca capacidade de posicionamento, fraca relação *peso da estrutura/carga manipulada*, fraca rigidez estrutural, pouco compacto, elevada inércia, reduzida largura de banda e grande espaço de trabalho

14

Estruturas Paralelas

Origem

- As estruturas mecânicas com actuadores em paralelo são estudadas pelo menos desde o século XIX
 - Por exemplo, é sabido que o matemático Cauchy (1813) realizou estudos sobre a rigidez de um *octaedro articulado*
- Stewart (1965) propôs uma estrutura paralela com 6 gdl (a plataforma de Stewart) que constituiu o primeiro passo para os actuais manipuladores paralelos



15

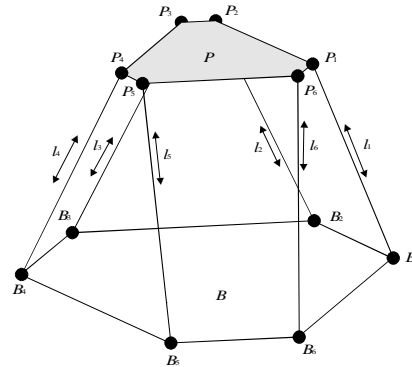
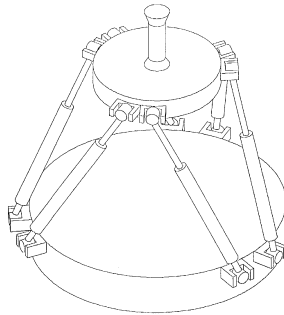
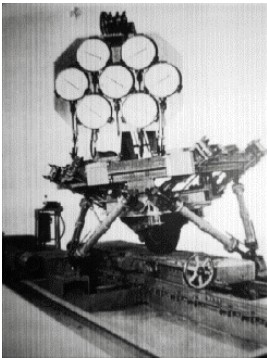
Estruturas Paralelas

Origem

- No entanto, a maior contribuição de Stewart foi adaptar a um simulador de voo uma estrutura (a plataforma de Gough) conhecida desde 1947, altura em que Gough a aplicou na construção de uma máquina para testar pneus
- Actualmente à plataforma de Gough é muitas vezes atribuída a designação de plataforma de Stewart ou de Stewart-Gough. A sua aplicabilidade não se limita à robótica, tendo sido, nos últimos anos, aplicada na construção de máquinas ferramentas de comando numérico

16

A Plataforma de Stewart



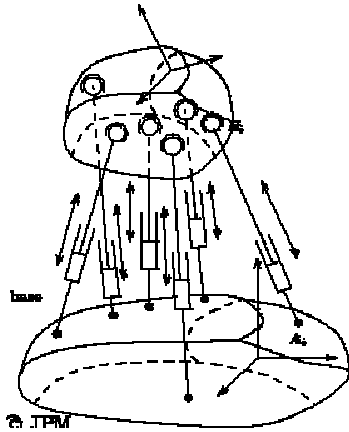
17

A Plataforma de Stewart

- Estrutura paralela que mais interesse tem despertado na comunidade científica
- Há uma tendência, por abuso de linguagem, de atribuir a designação de plataforma de Stewart a qualquer manipulador de estrutura paralela
- Possui 6 gdl
- A base, B , e a plataforma móvel, P , estão ligadas por 6 cadeias cinemáticas abertas, independentes e idênticas entre si, cada uma com 6 gdl do tipo *HPS* ou *SPH*
- Estrutura *plenamente paralela*, pois, em cada cadeia cinemática, somente uma junta é actuada (junta activa). Neste caso, os 6 gdl da plataforma móvel são conseguidos pela actuação em paralelo das 6 juntas prismáticas
- A plataforma e a base podem não ser planares e os pontos de ligação à base e à plataforma móvel podem ser quaisquer

18

A Plataforma de Stewart



Type 3-3



Type 3-6



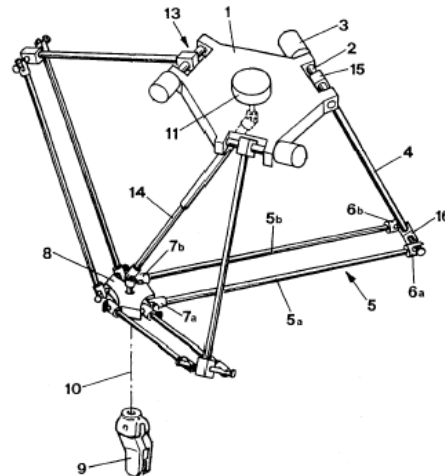
Type 6-6

19

Estruturas Paralelas

Estrutura Delta

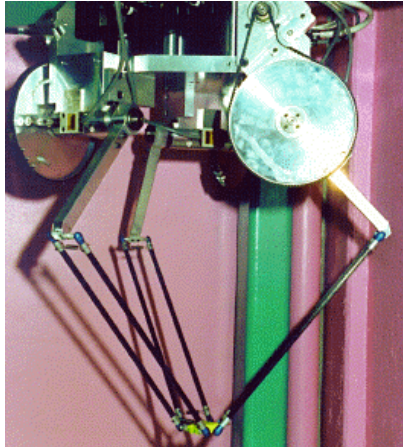
- Estrutura proposta na década de 80 por R. Clavel da EPFL, Suíça
- 3 gdl em translação (+ 1 gdl adicional em rotação)
- Variantes com juntas activas rotativas (RRR) ou prismáticas (RPR, RPR)
- Estrutura plenamente paralela



20

Estrutura Delta

Exemplos: RRR



- DELTA do LIRMM, França
- Web: <http://www.lirmm.fr/~pierrot/topics.html>
- Robô DELTA com 3 gdl em translação (RRR)

21

Estrutura Delta

Exemplos: RRR



- FlexPicker da ABB, Suécia
- Web: <http://www.abb.com/>
- Robô DELTA com 3 gdl em translação (RRR)
 - Dimensão: cilindro D950 x L1050 mm
 - Espaço de trabalho: cilindro D1130 x L250 mm
 - Pick-and-place: 120 produtos/min
 - Carga: 1kg

22

Estrutura Delta

Exemplos: RRR



- DELTA da Demarex, Suíça
- Web: <http://www.demaurex.ch/>
- Robô DELTA com 3 gdl em translação (RRR)
 - Dimensão: 600x600x160 mm
 - Espaço de trabalho: 880x880x1430 mm
 - Pick-and-place: 60 produtos/s

23

Estrutura Delta

Exemplos: RRR



- **SurgiScope** - Surgical Robotics Lab, Humboldt University, Berlim, Alemanha
- Web: <http://www.srl-berlin.de/>
- Robô DELTA numa aplicação médica (RRR)

24

Estrutura Delta

Exemplos: RRR



- Hitachi Seiki's Delta robots da Hitachi, Japão
- Web: <http://www.hitachiseiki.co.jp/machine/para/frame1.html>
- Robôs DELTA para operações de pick-and-place e furação (RRR)

25

Estrutura Delta

Exemplos: RRR



- Demarex's Line-Placer installation
- Web: <http://www.demarex.ch/>
- Linha de empacotamento de biscoitos usando robôs DELTA (RRR)

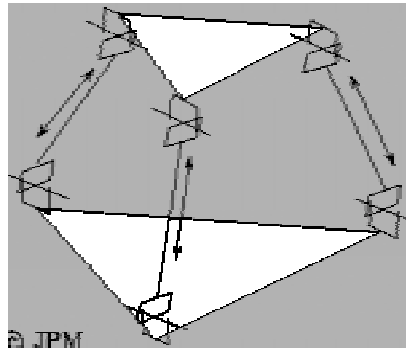
26

Estruturas Paralelas

Estrutura Delta: RPR



- Linapod I da Universidade de Estugarda, Alemanha
- Web: http://www.sfb514.uni-stuttgart.de/MainWeb.nsf/pages/sfb514_tp_c5.html
- Robô DELTA com 3 gdl em translação (RPR)



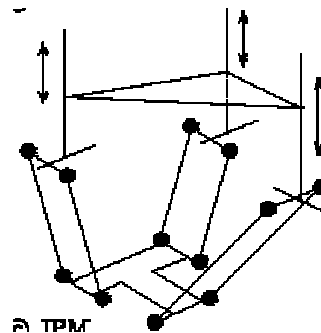
27

Estruturas Paralelas

Estrutura Delta: PRR



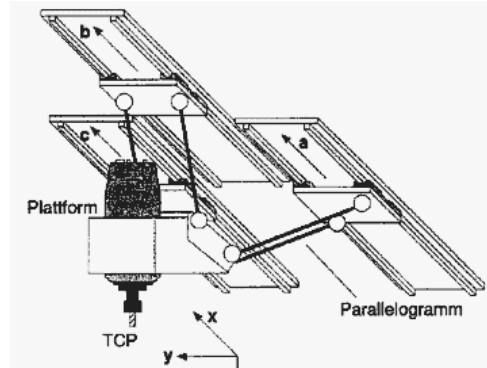
- Linapod II
- Web: http://www.fvs.rwth-schule.de/metall/swenherter/99/mauz_seeg_01.html
- Robô DELTA com 3 gdl em translação (PRR)



28

Estruturas Paralelas ***Estrutura Delta: PRR***

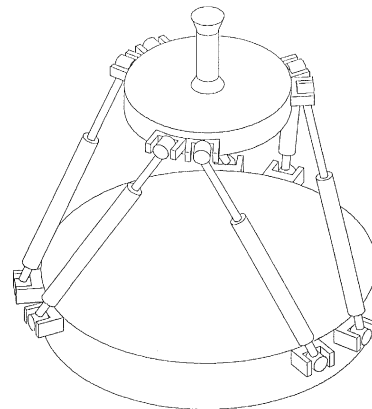
- Triaglide da GROB-Werke GMBH & CO., Alemanha
- Robô DELTA com 3 gdl em translação (PRR)
 - Aceleração máxima: 5 g



29

Estruturas Paralelas ***Plataforma de Stewart***

- Proposta por Gough em 1947 e adaptada por Stewart em 1965 para um simulador de voo
- Também conhecida por plataforma de Stewart-Gough
- 6 gdl
- Plenamente paralela
- Tipo HPS ou SPH, com as juntas prismáticas activas
- Estrutura paralela mais importante e mais estudada pela comunidade científica



30

Plataforma de Stewart

Exemplos: simuladores



- **Cyber Air Base** da ViRtogo Inc., Usa
- Web: <http://www.virtogo.com/MAIN.HTM>
- Simulador de voo com 6 gdl

31

Plataforma de Stewart

Exemplos: simuladores



- **Series 6 DOF 5000E** da Moog Inc., Usa
- Web: <http://www.moog.com/electrif/electrifying.htm>
- Simulador com 6 gdl

32

Plataforma de Stewart

Exemplos: simuladores



- **Ship Motion Simulator** da August Design, Inc., Usa
- Web: http://www.august-design.com/html/projects/hdr_moplatforms.htm
- Simulador de navio com 6 gdl

33

Plataforma de Stewart

Exemplos: Centros de maquinagem



- **Cosmo Center PM-600** da OKUMA, Japão
- Web: http://www.okuma.co.jp/info_i/newprof/pm600_01.htm
- Fresadora com 6 gdl
 - Dimensão: 2270x2800 mm
 - Espaço de trabalho:
 - X, Y, Z: 420x420x400 mm
 - Orientação: ± 25 graus
 - Velocidade máxima: 2000 mm/s
 - Aceleração máxima: 1.5 g

34

Plataforma de Stewart

Exemplos: Centros de maquinagem



- **MIKROMAT 6X** da MIKROMAT
Werkzeugmaschinenfabrik GmbH & Co. KG, Alemanha
- Web: <http://www.pdc.kth.se/pdctn/machinery/IndSol/Applic/Simulate/Hexanum/hexanumFReport.htm>
- Fresadora com 6 gdl
 - Dimensão: 6000x4000x4000 mm
 - Espaço de trabalho: 630x630x630 mm
 - Velocidade máxima: 500 mm/s
 - Aceleração máxima: 1 g
 - Exactidão: 10 µm

35

Plataforma de Stewart

Exemplos: Centros de maquinagem



- **Tornado 2000** da Hexel, EUA
- Web: <http://www.hexel.com/>
- Fresadora com 6 gdl
 - Dimensão: 2400x3000x3800 mm
 - Peso: 8000 kg
 - Espaço de trabalho:
 - X, Y, Z: 400 mm
 - Orientação: ± 45 graus
 - Velocidade máxima: 300 mm/s
 - Exactidão: 25 µm

36

Plataforma de Stewart

Exemplos: Centros de maquinagem

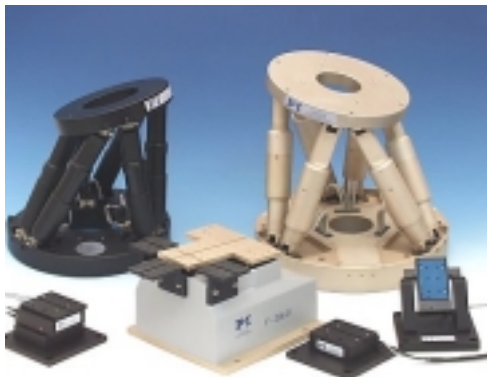


- HexVantage machine da Pathfinders Incorporated, EUA
- Web: <http://www.execpc.com/pathfinders/index.html>
- Fresadora com 6 gdl
 - Dimensão: 2400x3000x3800 mm
 - Espaço de trabalho:
 - Cilindro: D165 mm por L190 mm
 - Orientação: ± 15 graus
 - Exactidão: 15 μ m

37

Plataforma de Stewart

Exemplos: Robôs



- M-850 Hexapod da PI - Precision and Innovation, Alemanha
- Web: http://www.physikinstrumente.com/micropositioningsystems/8_4.html
- Robô com 6 gdl
 - Espaço de trabalho:
 - X, Y: ± 50 mm; Z: ± 25 mm
 - Orientação: X, Y: $\pm 15^\circ$; Z: $\pm 30^\circ$
 - Velocidade máxima: 0.5 mm/s
 - Carga: 50kg
 - Repetibilidade: $\pm 2 \mu$ m; $\pm 10 \mu$ rad
 - Exactidão: 1 μ m
 - Peso: 17 kg

38

Plataforma de Stewart

Exemplos: Robôs



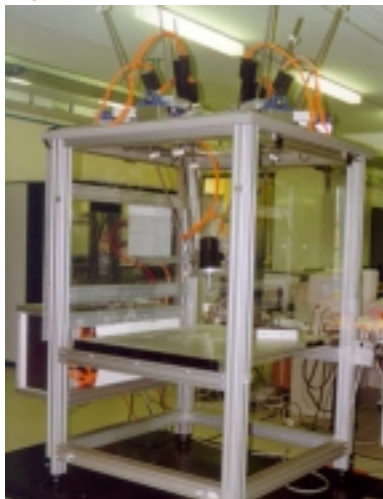
- **SAMM** da Hexel, EUA
- Web: <http://www.hexel.com/>
- Robô com 6 gdl

- Dimensão: cilindro D275 x L241 mm
- Peso: 22.5 kg
- Espaço de trabalho:
 - Translação: cilindro D25.4 mm por 25.4 mm
 - Orientação: X, Y: +/- 5°; +/- 10°
- Repetibilidade: 6.3 µm
- Exactidão: 10.2 µm

39

Plataforma de Stewart

Exemplos: Robôs



- **Acrobat** da ITIA, CNR, Mailand
- Web: <http://www.ttsnetwork.com/acrobat/>
- Robô com 6 gdl

40

Plataforma de Stewart

Exemplos: Robôs



- F-200i da Fanuc, Japão
- Web: <http://www.fanucrobotics.com/Products.asp>
- Robô com 6 gdl

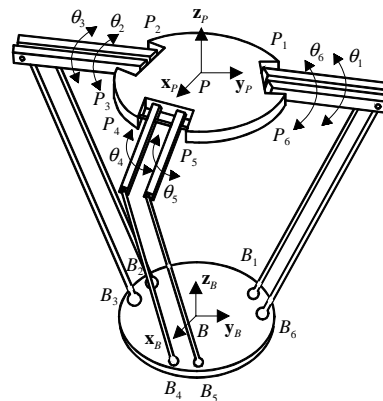
- Espaço de trabalho: 437 mm x 1040 mm
- Velocidade máxima:
 - X, Y: 1500 mm/sec
 - Z: :300 mm/sec
- Carga: 100kg
- Repetibilidade: ± 0.1 mm

41

Estruturas Paralelas

Estrutura Hexa

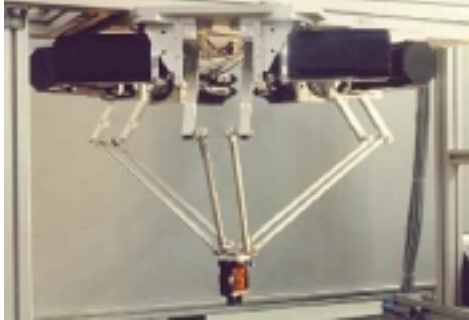
- Estrutura proposta no início da década de 90 pelos investigadores do LIRM, Montpellier, França, e desenvolvida pelos investigadores japoneses M. Uhiyama da Tohoku University e O. Toyama da TOYODA Machine Works, Ltd.
- 6 gdl
- Juntas activas rotativas (RHS)
- Estrutura plenamente paralela



42

Estrutura Hexa

Exemplos: Robôs



- **6-axis-elbow lever drives** da IFH TU Braunschweig
- Robô com 6 gdl

43

Estrutura Hexa

Exemplos: Robôs

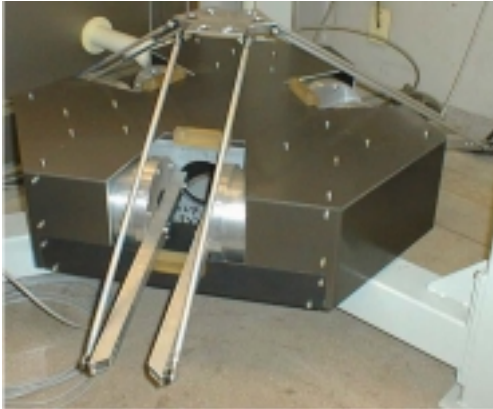


- **Robô Hexa** da Toyoda, Japão
- Web: <http://perso.infonie.fr/patrick.maurine/project.htm>
- Robô com 6 gdl

44

Estrutura Hexa

Exemplos: Robôs



- **Robô Hexa** da Tohoku University, Japão
- Web: <http://perso.infonie.fr/patrick.maurine/project.htm>
- Robô com 6 gdl

45

Estrutura Hexa

Exemplos: Centro de maquinagem



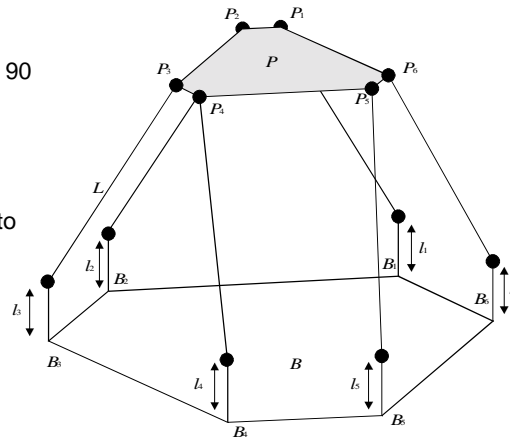
- **HexaM** da Toyoda, Japão
- Web: <http://perso.infonie.fr/patrick.maurine/project.htm>
- Centro de Maquinagem com 6 gdl

46

Estruturas Paralelas

Plataforma de Merlet

- Estrutura proposta no início da década de 90 por J.-P. Merlet do INRIA - França
- 6 gdl
- Variante da plataforma de Stewart
- Juntas activas prismáticas, com movimento apenas segundo a perpendicular à base (PHS)
- Boa capacidade dinâmica
- Estrutura plenamente paralela



47

Plataforma de Merlet

Exemplos



- Dispositivo de Impedância Controlada - DIC – FEUP, DEMEGI, SAIC, Portugal
- Web: <http://www.fe.up.pt/~aml/>
- Robô com 6 gdl
 - Dimensão: cilindro D265 x L532 mm
 - Peso: 9.7 kg
 - Espaço de trabalho:
 - Translação: volume esférico com 10 mm de raio
 - Orientação: $\pm 15^\circ$
 - Repetibilidade: 70 μm ; $\pm 0.0908^\circ$
 - Exactidão: 88 μm

48

Plataforma de Merlet

Exemplos



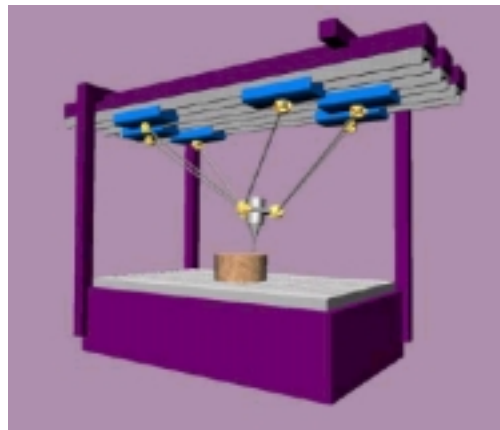
- Stewart Platform with Fixed Actuators, Columbia University, EUA
- Web: <http://www.cs.columbia.edu/~laza/Stewart/>
- Robô com 6 gdl

49

Estruturas Paralelas

Hexaglide

- Estrutura proposta pelos investigadores da ETH, Suíça
- 6 gdl
- Juntas activas prismáticas, com movimento apenas segundo um plano paralelo à base (PHS)
- Variante da plataforma de Stewart
- Boa capacidade dinâmica
- Grande espaço de trabalho
- Estrutura plenamente paralela



50

Hexaglide

Exemplos



- **Hexaglide** da ETH – Suisse Federal Institute of Technology, Suíça
- Web: http://www.iwf.bepi.ethz.ch/projekte/hexa/home_en/home_en.htm
- Robô com 6 gdl

51

Estruturas Paralelas

Outros exemplos

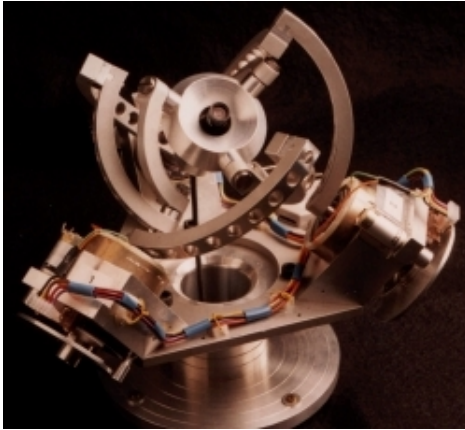


- **2 gdl planar**, Catholic University of America, EUA
- Web: <http://www.ee.cua.edu/~nguyen/robcon.html>
- Robô com 2 gdl

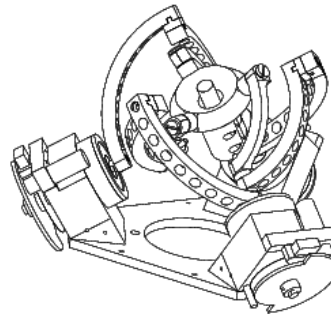
52

Estruturas Paralelas

Outros exemplos



- **3 gdl esférico**, University of Laval, Canadá
- Web: http://www.robot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme01_a.html
- Robô com 3 gdl



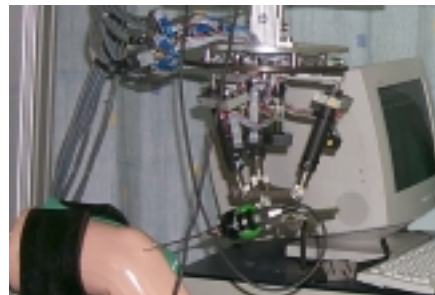
53

Estruturas Paralelas

Outros exemplos



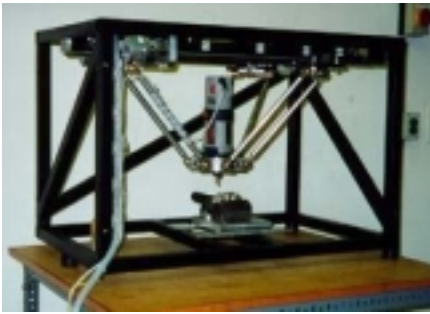
- **RSPR3 mini-parallel robot**, Technion-Israel Institute of Technology
- Web: <http://robotics.technion.ac.il/>
- Robô com 6 gdl



54

Estruturas Paralelas

Outros exemplos



- **Triaglide** da ETH – Suisse Federal Institute of Technology, Suíça
- Web: http://www.iwf.bepr.ethz.ch/projekte/hexa/home_en/home_en.htm
- Robô com 3 gdl

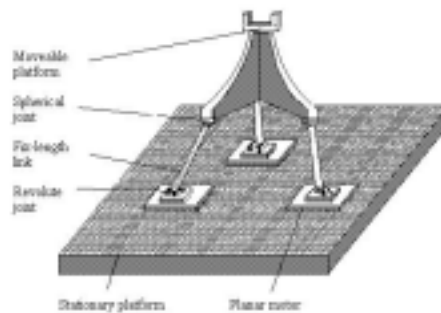
55

Estruturas Paralelas

Outros exemplos



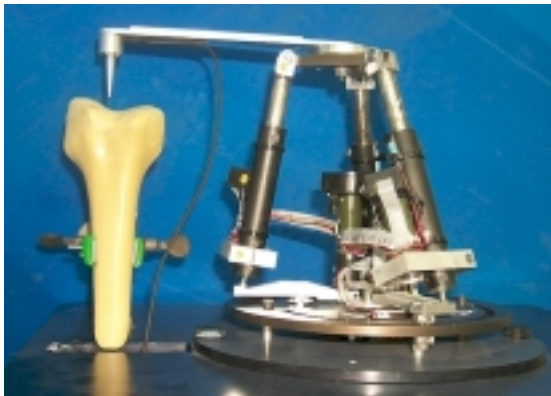
- Web: <http://robotics.technion.ac.il/>
- Robô com 6 gdl
- Motores planares



56

Estruturas Paralelas

Outros exemplos

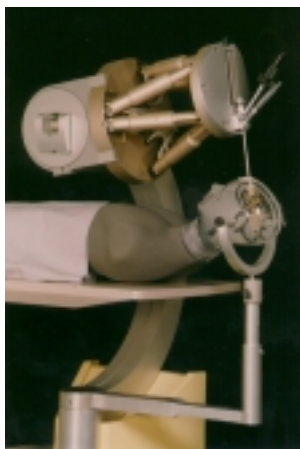


- Web: <http://robotics.technion.ac.il/>
- Robô com 6 gdl
- Identificação de superfície

57

Estruturas Paralelas

Outros exemplos



- Robô com 6 gdl
- Plataforma de Stewart
- Aplicação à cirurgia

58

Manipuladores Paralelos

Cinemática

- Sistemas de equações algébricas, tipicamente não lineares, que permitem relacionar a posição e a velocidade generalizada da plataforma (órgão terminal) com a posição e a velocidade das juntas activas

- Cinemática de posição directa
 - Posição generalizada (cartesiana) do órgão terminal a partir da posição das juntas
- Cinemática de posição inversa
 - Posição das juntas a partir da posição generalizada (cartesiana) do órgão terminal
- Cinemática de velocidade (diferencial) directa
 - Velocidade generalizada (cartesiana) do órgão terminal a partir da velocidade das juntas
 - (Jacobiano directo)
- Cinemática de velocidade (diferencial) inversa
 - Velocidade das juntas a partir da velocidade generalizada (cartesiana) do órgão terminal
 - (Jacobiano inverso)

Manipuladores Paralelos

Cinemática de posição inversa

- **Juntas \leftarrow Órgão terminal**

- É um problema simples
- A solução em muitos dos casos é única
 - Por exemplo, em algumas estruturas plenamente paralelas (Stewart, Merlet)
- A solução pode ser determinada analiticamente

Manipuladores Paralelos

Cinemática de posição directa

- **Órgão terminal \Leftarrow Juntas**

- É um problema difícil
- Com soluções múltiplas
- Muito difícil de resolver analiticamente
 - Excepto para algumas configurações estruturais particulares

61

Manipuladores Paralelos

Cinemática de posição directa: solução

- **Métodos de eliminação**
 - Tenta-se exprimir o sistema de equações algébricas não lineares num polinómio de uma única variável
 - Todas as posições possíveis pertencem ao conjunto das raízes do polinómio
 - Permitem encontrar todas as soluções
 - Soluções parasitas
 - Permitem quantificar o efeito dos erros introduzidos pelas variáveis das juntas na posição generalizada da plataforma
 - Permitem prever as singularidades
 - Requerem um tempo de cálculo da ordem de 50 vezes superior aos métodos numéricos iterativos
 - O cálculo de raízes de polinómios de grau elevado é muito sensível à precisão numérica

62

Manipuladores Paralelos

Cinemática de posição directa: solução

- Métodos baseados no conhecimento de variáveis auxiliares redundantes
 - O conhecimento dessas variáveis facilita a resolução do problema
 - Na prática implica a utilização de transdutores adicionais
- Métodos numéricos iterativos
 - São computacionalmente menos pesados
 - Permitem apenas a determinação de uma única solução
 - Podem apresentar sérios problemas de convergência
 - Soluções parasitas

Manipuladores Paralelos

Cinemática de velocidade

- **Juntas \Leftarrow Órgão terminal**
- Determinação do jacobiano inverso
- É um problema simples

- **Órgão terminal \Leftarrow Juntas**
- Determinação do jacobiano directo
- Resolução analítica é difícil
- Tipicamente inverte-se o jacobiano inverso
 - Inversão numérica robusta (pseudo-inversa)
 - Inversão simbólica (Maple)

Manipuladores Paralelos ***Singularidades***

- Os manipuladores *paralelos híbridos* podem apresentar 2 tipos de singularidades
 - Singularidades idênticas às dos manipuladores série
 - » Configurações em que o manipulador perde um ou mais gdl
 - » Não pode haver movimento segundo esses gdl
 - » Uma força aplicada na plataforma é totalmente absorvida pela estrutura. Os actuadores não exercem força. A estrutura apresentar-se-á infinitamente rígida
 - » Anulação do determinante do jacobiano directo
 - Outro tipo de singularidades
 - » Configurações em que o manipulador ganha um ou mais gdl não controlados
 - » A plataforma pode mover-se sem que os actuadores se movam
 - » Uma força aplicada na plataforma não pode ser resistida quaisquer que sejam as forças aplicadas pelos actuadores
 - » Anulação do determinante do jacobiano inverso
- Os manipuladores *plenamente paralelos* apenas podem apresentar singularidades do segundo tipo

65

Manipuladores Paralelos ***Singularidades***

- Solução:
 - Determinação analítica das raízes do determinante
 - » Leva na maioria dos casos a expressões muito complicadas
 - Determinação numérica das raízes do determinante
 - » Problemas de convergência
 - » Pode não ser possível encontrar todas as soluções
 - » Soluções parasitas
 - Abordagem baseada na geometria de Grassmann

66

Manipuladores Paralelos

Espaço de trabalho

- A determinação do espaço de trabalho é, em geral, uma tarefa difícil (em especial para estruturas com mais de 3 gdl)
- Não é possível desacoplar o espaço de trabalho em dois sub-espacos tridimensionais (como acontece nos manipuladores série com punhos esféricos)
- O espaço de trabalho depende de:
 - Limites dos actuadores
 - Limites das juntas passivas
 - Interferência entre os elos de cada cadeia cinemática e entre cadeias cinemáticas
- Tipicamente:
 - Separa-se o problema em dois mais simples
 - » Determinação do espaço de trabalho em posição (orientação fixa)
 - » Determinação do espaço de trabalho em orientação (posição fixa)
 - Impõe-se o espaço de trabalho
 - » Determina-se o curso necessário para os actuadores
 - » Verifica-se se não são excedidos os limites das juntas passivas
 - » Verifica-se se não existe interferência entre elos

Manipuladores Paralelos

Optimização cinemática da estrutura

- Uma vez escolhida a estrutura é necessário dimensioná-la:
 - Estabelecer relações entre os diferentes parâmetros cinemáticos
- A escolha do critério de optimização da estrutura de um manipulador depende, em grande parte, da sua potencial aplicação
- Possíveis critérios de optimização
 - Maximização do espaço de trabalho
 - Maximização da rigidez estrutural
 - Maximização da mobilidade da estrutura
 - » Variadas interpretações de mobilidade motivam a utilização de diferentes índices para a sua quantificação
 - Critério relacionado com as amplitudes de movimentos das juntas
 - Volume do espaço de trabalho no qual o manipulador pode assumir qualquer orientação
 - Especificação da resposta dinâmica do manipulador

Manipuladores Paralelos

Dinâmica

- O modelo dinâmico de um sistema mecânico permite relacionar a evolução temporal da sua configuração (nomeadamente, a posição, a velocidade e a aceleração) com as forças e momentos que nele actuam
- É necessário para controlo
 - É fundamental conhecer as forças de comando, a aplicar pelos actuadores, para que o órgão terminal cumpra a trajectória pretendida - **dinâmica inversa**
- É necessário para simulação
 - É importante saber como vai reagir o mecanismo quando sujeito a uma determinada força de comando, ou seja, interessa saber a variação da posição, da velocidade e da aceleração do órgão terminal, em função do vector de forças aplicadas pelos actuadores - **dinâmica directa**

69

Manipuladores Paralelos

Dinâmica

- É um problema complexo
- Em geral, algoritmos adequados à modelação de determinadas estruturas não são generalizáveis
- O peso computacional envolvido é muito elevado
- Sobretudo para controlo efectua-se simplificações dos modelos que retêm apenas as características principais do sistema
- Soluções:
 - Método de Lagrange
 - » Método de energia
 - » Sistemático
 - » Equações compactas mas com pouco significado físico
 - Método de Newton-Euler
 - » Utiliza as forças e momentos aplicados nos corpos que constituem o sistema
 - » Permite obter as forças internas de reacção nas juntas
 - » Equações com significado físico claro
 - Método da Quantidade de Movimento Generalizada (novo)
 - » Método de energia
 - » Computacionalmente eficiente

70

Manipuladores Paralelos

Controlo

- Dadas as suas características as estruturas paralelas são atractivas para utilização em operações que envolvem contacto do manipulador com o meio ambiente
 - Controlo de posição
 - Controlo de força
 - Controlo de impedância
- Os algoritmos de controlo são exigentes do ponto de vista computacional
 - A cinemática e dinâmica são computacionalmente exigentes
 - O forte acoplamento dinâmico exige controladores robustos

71

Dualidade Manipuladores série

Manipuladores paralelos

	Série	Paralelo
Cinemática directa	Fácil análise Solução única	Difícil análise Soluções múltiplas
Cinemática inversa	Difícil Soluções múltiplas	Fácil Solução única
Singularidades	Difícil análise 1 tipo de singularidade Perda de gdl	Muito difícil análise 2 tipo de singularidade Ganho de gdl
Espaço de trabalho	Desacoplamento do espaço Fácil análise	Impossível o desacoplamento do espaço Difícil análise
Dinâmica	Difícil análise	Muito difícil análise
Controlo	Exigente	Muito exigente

72

Dispositivo de Impedância Controlada - DIC

Problema: Falta de capacidade de controlo de força e de impedância exibida pelos **manipuladores robóticos industriais**

↳ *Capacidade necessária em tarefas que envolvam contacto físico entre o manipulador e o ambiente (ex: polimento, rebarbagem e montagem)*

Possíveis abordagens:

- Utilização de dispositivos auxiliares passivos, como os RCC's, a inserir entre a extremidade do manipulador e a garra
 - ↳ *Solução limitada pela pouca flexibilidade destes dispositivos*
- Alteração do subsistema de controlo do robô industrial
 - ↳ *Solução limitada pela reduzida largura de banda das estruturas mecânicas em série habitualmente usadas*
- Utilização de **dispositivos robóticos auxiliares** (uma espécie de "RCC's activos")

73

Dispositivo de Impedância Controlada - DIC

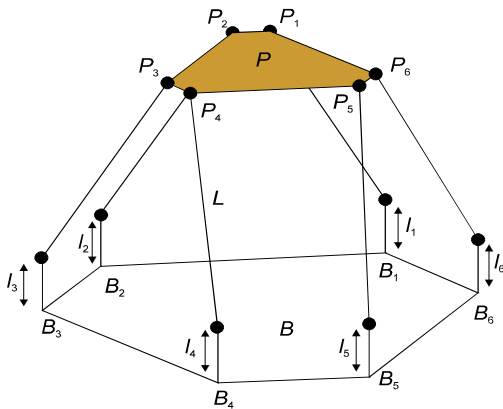
- Selecção de uma estrutura mecânica para o dispositivo robótico: estrutura paralela com 6 gdl
 - ↳ **plataforma de Merlet**
- Modelação e optimização cinemática da estrutura
- Modelação dinâmica da estrutura
- Desenvolvimento e aplicação de estratégias de controlo de força-impedância
- Simulação e validação das estratégias de controlo aplicadas ao dispositivo
- Construção de um protótipo
- Experimentação e avaliação das capacidades do dispositivo, em tarefas típicas de inserção ("pino-no-furo") e de seguimento de contornos

74

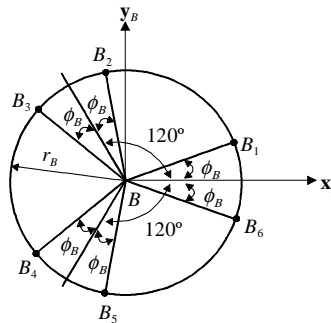
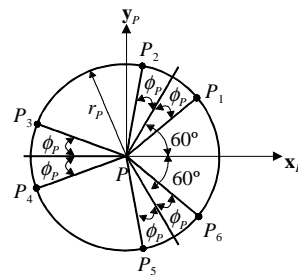
Dispositivo de Impedância Controlada - DIC



DIC Estrutura mecânica



Estrutura paralela com 6 gdl (Plataforma de Merlet)



- Cinemática de posição directa: **método analítico**
 - 16 soluções
 - Necessário processo de decisão adicional para escolher a solução (ex: escolher sempre a solução que está mais próxima da anterior)
 - Tempos de computação incompatíveis com uma aplicação de controlo de tempo-real
- Cinemática de posição directa: **método numérico iterativo**
 - 1 solução
 - Não há problemas de convergência se, em cada instante, se usar como solução inicial a solução obtida no instante anterior
 - A solução é sempre a que está mais próxima da anterior
- Cinemática de velocidade directa
 - Inversão numérica do jacobiano inverso usando o algoritmo da pseudo-inversa de Moore-Penrose

- **Objectivo:** dimensionamento dos parâmetros geométricos ($r_B, r_P, L, \phi_B, \phi_P$)
- **Critério de optimização:** maximização da mobilidade
 - ↳ *idêntica capacidade de exercer ou de controlar força ou velocidade segundo qualquer direcção no espaço*

Optimização:

- Definição de um índice para quantificação da mobilidade, η , que representa a evolução do factor de condicionamento do jacobiano, κ , no volume de trabalho de interesse:

$$\eta = \frac{\int_W \left(\frac{1}{\kappa} \right) dW}{\int_W dW}$$

- Maximização desse índice, que é uma função dos parâmetros geométricos
- Obtenção de uma solução (estrutura) óptima

DIC

Optimização cinemática

Solução adoptada:

- Estrutura (plataforma de Merlet) do tipo 6-3

☛ $\phi_p = 0, \phi_B = 15^\circ, r_B = 2 r_p$ e $L = 2.45 r_p$

☛ Boa exequibilidade mecânica

☛ Boa mobilidade dentro do espaço de trabalho de interesse

DIC

Características

Transmissão	Fuso/fêmea de esféras
Estrutura mecânica	Plenamente paralela: Plataforma de Merlet
Graus de liberdade	6
Espaço de trabalho	Posição: volume esférico com 10 mm de raio; Orientação: $\pm 15^\circ$ segundo um eixo arbitrário
Capacidade de carga	5 Kg
“Repetibilidade”	Translacional: 70 μm ; Angular: $\pm 0.0908^\circ$
“Exactidão”	88 μm
Motorização	Eléctrica
Sensorização	Posição, aceleração e força/momento
Controlador	PC Pentium II \cong 400 MHz
Massa	9.7 Kg
Atravancamento	Altura (plataforma na posição extrema superior): 532 mm Diâmetro máximo: 265 mm



Seguimento de um contorno



*Inserção de um pino
(pino perpendicular à plataforma móvel)*

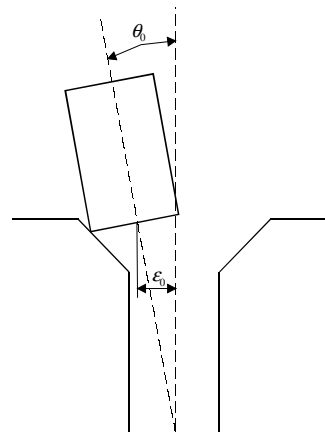
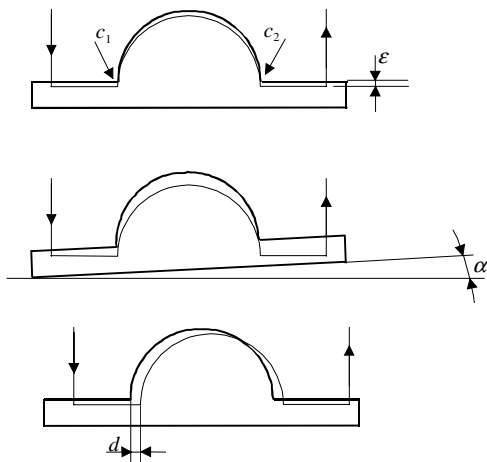


*Inserção de um pino
(pino paralelo à plataforma móvel)*

Procedimento:

- Programação do robô industrial com o dispositivo imobilizado (especificação da trajectória)
- Programação do dispositivo (especificação da impedância e da força desejada)
- Alteração da posição das peças relativamente ao robô (introdução de desalinhamentos)
- Execução do programa do robô industrial com o dispositivo activado

81



82