

MÁRIO SARCINELLI FILHO

CONTROLE DE SISTEMAS MULTIRROBÔS



Blucher

Controle de sistemas multirrobo

Mário Sarcinelli Filho

*Controle de sistemas multirrobo*s

© Mário Sarcinelli Filho

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editores Eduardo Blücher e Jonatas Eliakim

Coordenação editorial Addressa Lira

Produção editorial Kedma Marques

Revisão de texto Horizon Soluções Editoriais

Imagem da capa iStockphoto

Capa Laércio Flenic

Editora Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4^o andar

CEP 04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, julho, 2021. É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Sarcinelli Filho, Mário

Controle de sistemas multirrobo / Mário Sarcinelli Filho.– São Paulo: Blucher, 2023.

123 p.,

ISBN 978-85-212-2150-0 (impresso)

ISBN 978-85-212-2148-7 (eletrônico)

1. Robótica 2. Controle de sistemas 3. Sistemas multirrobo

23-4913

CDD 629.892

Índices para catálogo sistemático: I. Robótica

Conteúdo

Lista de figuras	17
1 Introdução	23
1.1 Paradigmas de controle para SMR	24
1.1.1 Estrutura/formação líder-seguidor	24
1.1.2 Estrutura virtual	26
1.1.3 Paradigma de controle baseado em comportamentos .	28
1.2 Conteúdo subsequente do texto	29
1.3 O controlador de cinemática inversa	30
1.3.1 Seguimento de trajetória	30
1.3.2 Posicionamento	32
1.3.3 Seguimento de caminho	33
2 Cinemática dos robôs móveis utilizados	35
2.1 Robôs móveis a rodas de tração diferencial	36
2.2 Robôs móveis a rodas omnidirecionais	40
2.3 Robôs móveis aéreos do tipo quadrimotor	43
3 Controle de formações líder-seguidor	47
3.1 Controle de uma formação líder-seguidor com dois robôs . .	48
3.2 Controle de uma formação líder-seguidor com três ou mais robôs	50

3.3	Exemplos de controle de formações	
	líder-seguidor	52
3.3.1	Exemplo 1: Posicionamento do líder	52
3.3.2	Exemplo 2: Seguimento de trajetória pelo líder	54
3.3.3	Exemplo 3: Experimento com dois quadrimotores <i>Bebop 2</i>	56
3.3.4	Exemplo 4: Experimento com um líder terrestre e um seguidor aéreo	60
3.3.5	Exemplo 5: Formação com um líder do tipo omnidi- recional e dois seguidores omnidirecionais	66
4	Controle de formações baseado em estruturas virtuais	69
4.1	O espaço da formação e o espaço dos robôs	70
4.2	A estrutura de controle proposta	72
4.3	Exemplos de controle de formações com base na estrutura virtual	77
4.3.1	Exemplo 1: Posicionamento da estrutura virtual, para dois robôs unicycle	77
4.3.2	Exemplo 2: Seguimento de trajetória utilizando dois quadrimotores	78
4.3.3	Exemplo 3: Posicionamento de uma formação de três robôs unicycle	83
4.3.4	Exemplo 4: Seguimento de caminho por uma estru- tura virtual com um robô unicycle e um quadrimotor	85
4.3.5	Exemplo 5: Seguimento de trajetória por uma formação de dois robôs omnidirecionais	90
5	Controle de formações com múltiplos objetivos	95
5.1	Controle comportamental baseado em espaço nulo	96
5.2	Exemplos	99

5.2.1	Exemplo 1: Estrutura virtual com dois robôs omnidirecionais, com prioridade para a subtarefa de manter a forma da estrutura	99
5.2.2	Exemplo 2: Formação de dois robôs omnidirecionais seguindo uma trajetória num ambiente com um obstáculo	101
5.2.3	Exemplo 3: Posicionamento de uma formação composta por um robô uniclo e um quadrimotor, com desvio de obstáculo no chão	109
6	Conclusão	113
	Referências	115
	Índice remissivo	121

Capítulo 1

Introdução

Um sistema de múltiplos robôs (SMR), também conhecido como sistema multirrobo, é um grupo de vários robôs, homogêneo, quando todos os robôs do grupo têm a mesma cinemática, ou heterogêneo, caso contrário, trabalhando de forma cooperativa para o cumprimento de uma dada tarefa [7]. Recentemente, seu uso tem se tornado comum em várias aplicações, uma vez que, em muitos casos, é mais eficiente e/ou mais barato utilizar-se um grupo de robôs, normalmente de menor custo, ao invés de um só robô capaz de realizar a mesma tarefa, que pode ser bem mais caro que um grupo de robôs mais simples. A própria natureza da tarefa a ser realizada pode demandar utilizar mais robôs. Esse é o caso, por exemplo, da busca por sobreviventes em meio a escombros, uma vez que vários robôs permitem inspecionar uma área maior em menor tempo, sendo tempo um fator primordial para garantir a sobrevivência das pessoas afetadas. Outro caso claro é a detecção e desarmamento de minas terrestres. No decorrer da busca, pode ocorrer a explosão de alguma mina, e a destruição do robô que faz a detecção das minas. Caso se esteja utilizando um único robô e ele exploda, então a tarefa fica prejudicada. Se for utilizado um grupo de robôs, porém, a eventual perda de um deles não impede, a princípio, a continuidade da tarefa. Outros casos claros são transporte de cargas, em que o formato e/ou peso da

carga podem demandar mais robôs para transportá-la, como é o caso em [8].

Qualquer que seja a razão para utilizar um SMR, um fator primordial é que os robôs membros do grupo, os agentes, têm que atuar de forma cooperativa para que a tarefa seja cumprida como esperado. Assim, uma palavra chave associada a um SMR é coordenação. Em outras palavras, a atuação dos robôs componentes do grupo deve ser coordenada, de forma que quando se projeta um sistema de controle para um SMR, deve-se projetar um sistema de controle que assegure a coordenação de todos os robôs do grupo, e não um sistema de controle que atue isoladamente sobre cada agente do grupo.

Esse é o contexto considerado ao longo deste livro, em que serão mostrados diversos projetos de controladores para SMR homogêneos e heterogêneos.

1.1 Paradigmas de controle para SMR

No contexto de controle coordenado de um grupo de robôs, três paradigmas principais podem ser adotados para controlar um grupo de robôs, a saber: estrutura líder-seguidor [9, 10, 11], estrutura virtual [12, 13, 6, 14] e controle baseado em comportamentos [15, 16, 17, 18].

1.1.1 Estrutura/formação líder-seguidor

Uma estrutura líder-seguidor corresponde à uma formação, ou um SMR, composto de dois robôs, um deles atuando como seguidor de um outro robô, o líder da formação, replicando seu movimento [9, 11]. Isso significa que o robô líder tem um sistema de controle próprio, para que ele se posicione num ponto desejado do plano, se ele for um veículo terrestre não tripulado (VTNT), ou do espaço, se se tratar de um veículo aéreo não tripulado

(VANT), enquanto o robô seguidor tem um segundo sistema de controle, para o qual as referências de posição e velocidade são dadas pela posição e velocidade do robô líder. Em outras palavras, o robô seguidor sempre será controlado para seguir uma trajetória, a qual será definida pelo robô líder, preservando uma distância relativa entre eles, no plano ou no espaço [11]. Embora a expressão líder-seguidor se aplique muito claramente a um grupo de dois robôs, a estrutura líder-seguidor pode ser ampliada para conter vários seguidores para o mesmo líder, caso este em que a estrutura se assemelha ao gráfico da esquerda da Figura 1.1, ou então fazendo com que o seguidor do primeiro líder seja um líder para outro seguidor, gerando uma estrutura semelhante à uma corrente, como ilustrado na parte direita da mesma figura.

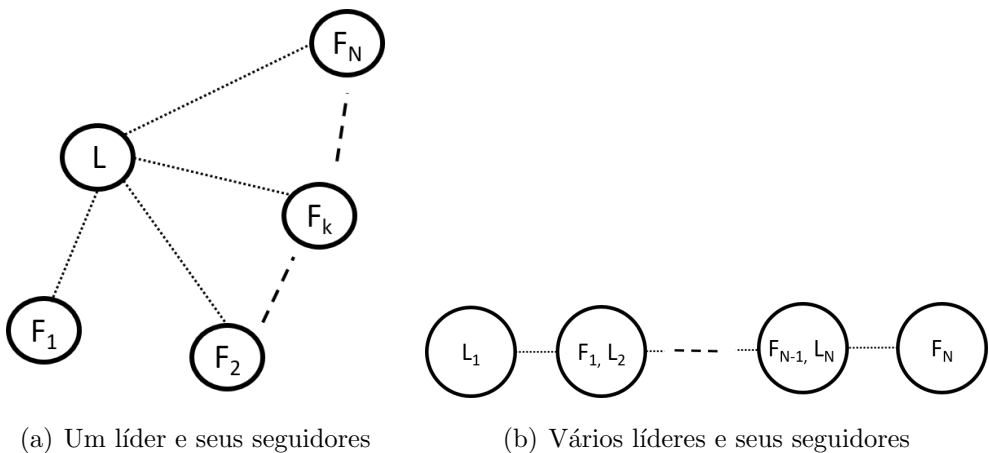


Figura 1.1 – Duas formas de estrutura líder-seguidor, considerando um grupo de $N + 1$ robôs. A estrutura da esquerda contém um só líder e vários seguidores, enquanto naquela da direita os seguidores são também líderes de outros robôs, formando uma estrutura em cascata.

Entretanto, como o seguidor (ou os seguidores) replicam o movimento do líder, caso o líder venha a sofrer uma falha, e assim parar, toda a formação para seu movimento, o que impede a continuidade da tarefa. Sem dúvida alguma isto é uma grave limitação da formação líder-seguidor. Uma

forma de resolver esse problema da continuidade da tarefa, quando há vários agentes no grupo, é reconfigurar a formação, estabelecendo um novo líder, como é feito em [19], por exemplo.

1.1.2 Estrutura virtual

Referindo-se à estrutura virtual, toda a formação ou grupo de robôs é considerada como um único agente, tratado como um robô virtual, portanto, sem massa/inércia, e daí sem nenhum problema associado à sua dinâmica [6, 14]. Seja como exemplo um sistema formado por dois robôs terrestres, como ilustrado na Figura 1.2. Nesse caso, a estrutura virtual a ser considerada é a reta que une os dois robôs. Tal estrutura virtual pode ser descrita por intermédio das coordenadas de um ponto qualquer da mesma, sua inclinação e seu comprimento, que são as chamadas variáveis da formação (a posição (x_F, y_F) do ponto de referência no plano X^wY^w do sistema de coordenadas global, o ângulo α_F que tal reta faz com o eixo X^w e o comprimento ρ_F de tal reta). O movimento de tal estrutura virtual gera referências de movimento para os dois robôs, cujo movimento altera a configuração da formação, ou seja, do SMR. Dessa forma, o controle também considera o conjunto de variáveis (x_1, y_1) e (x_2, y_2) correspondente às posições dos dois robôs da formação, denominadas variáveis dos robôs, que se alteram com o movimento dos mesmos, trazendo, como consequência, a modificação das variáveis da formação. Nota-se, porém, que a estrutura virtual não necessariamente é uma reta no plano. Para dois veículos aéreos, por exemplo, ela corresponde a uma reta no espaço cartesiano, agora descrita por seis variáveis, a saber: a posição (x_F, y_F, z_F) de um ponto de referência, dois ângulos, α_F e β_F , e o comprimento da reta ρ_F , sendo que as variáveis dos robôs também serão seis, nesse caso, a saber: as posições (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) dos dois veículos no espaço cartesiano.

Outras estruturas podem ser consideradas, como um triângulo num plano [14, 20] ou um triângulo no espaço cartesiano [16], por exemplo. Em

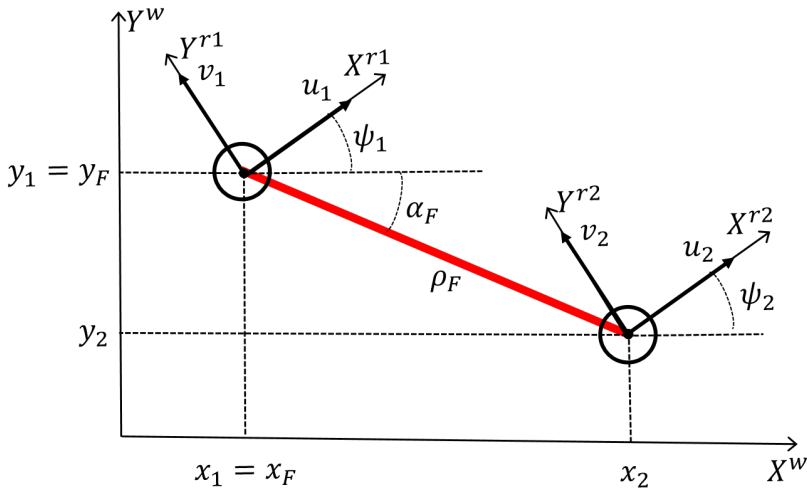


Figura 1.2 – Exemplo de uma estrutura virtual, formada por dois robôs terrestres. A estrutura virtual é o segmento de reta em cor vermelha, sendo as variáveis da formação e as variáveis dos robôs também indicadas. O ponto tomado como referência para descrever a estrutura virtual, como se vê, coincide com o robô número 1.

suma, a estrutura virtual corresponde, em geral, a uma figura geométrica bem definida, em que os robôs da formação ocupam os vértices do polígono correspondente, ou as extremidades, no caso particular de SMR compostos por dois veículos.

Consequentemente, o paradigma de controle baseado em estrutura virtual considera dois conjuntos de variáveis, as variáveis da formação e as variáveis dos robôs, caracterizando-se, assim, dois espaços de trabalho, o espaço da formação e o espaço dos robôs [18, 14]. As relações de transformação/mapeamento de um de tais espaços para o outro podem ser obtidas pela análise da geometria correspondente à estrutura virtual, por exemplo, em [13, 6, 14, 16].

Uma vantagem desse paradigma em relação ao de líder-seguidor é que não há mais um líder que determina como o seguidor ou os seguidores devem se mover e cuja parada causa a parada de todo o SMR.

Caso haja a perda de um robô da formação, simplesmente se pode redefinir a estrutura virtual e prosseguir com a tarefa.

1.1.3 Paradigma de controle baseado em comportamentos

O paradigma de controle baseado em comportamentos se baseia na decomposição da tarefa em várias subtarefas, que se caracterizam como comportamentos. A partir daí, se utilizam técnicas que permitam integrar os comportamentos, gerando o sinal de controle final a ser enviado para os robôs da formação. Exemplos de comportamentos, nesse contexto, são: desviar de obstáculos, manter a formação especificada e mover a formação conforme a tarefa sendo executada (posicionamento, seguimento de caminho ou seguimento de trajetória) etc.

Uma forma analítica de integrar tais comportamentos para gerar o sinal de controle adequado é usar a técnica de controle comportamental baseado em espaço nulo [15, 21], que corresponde a gerar o sinal de controle a ser enviado a cada robô da formação a partir de uma integração dos sinais parciais correspondentes à cada subtarefa (cada comportamento) com base num sequenciamento das subtarefas, conforme uma lista de prioridades predefinida, em que uma subtarefa de prioridade mais baixa é projetada no espaço nulo da matriz jacobiana que descreve a cinemática associada à subtarefa de prioridade imediatamente acima [22]. Embora esta não seja a única forma de integrar os diversos comportamentos em uma estrutura de controle, é uma forma bastante utilizada, inclusive por ter a estabilidade provada com base na teoria de Lyapunov [21]. Como exemplo de utilização de tal técnica, pode-se citar o trabalho em [16], em que uma formação contendo três robôs aéreos é controlada, considerando duas subtarefas, que são mover o centro de gravidade do triângulo correspondente à formação e manter sua forma e orientação.

1.2 Conteúdo subsequente do texto

O restante do livro inclui os seguintes capítulos:

1. Capítulo 2, que traz os modelos cinemáticos dos robôs terrestres (especificamente robôs a rodas do tipo tração diferencial e omnidirecional) e aéreos (especificamente veículos tipo helicóptero, em particular quadrimotores), utilizados nos capítulos subsequentes;
2. Capítulo 3, que trata, especificamente, do controle de formações do tipo líder-seguidor;
3. Capítulo 4, que trata, especificamente, de controle de formações baseado em estruturas virtuais;
4. Capítulo 5, que trata, especificamente, do controle de formações com múltiplos objetivos, utilizando o controle comportamental baseado em espaço nulo;
5. Capítulo 6, em que algumas conclusões tiradas dos desenvolvimentos tratados nos capítulos anteriores são destacadas.

Ainda sobre o conteúdo subsequente do texto, é importante destacar que somente controladores baseados em cinemática serão discutidos nos capítulos subsequentes. Isso quer dizer que os robôs serão tratados como pontos sem massa/inércia e, por isso, os controladores apresentados nos capítulos subsequentes não considerarão as acelerações finitas (lineares e angulares) dos veículos. Em outras palavras, assume-se que os veículos são capazes de apresentar a velocidade comandada instantaneamente, ou seja, são veículos com capacidade de aceleração infinita. Em algumas situações específicas, porém, é interessante usar um compensador dinâmico para reduzir o erro de seguimento de velocidade, contribuindo, dessa forma, para reduzir o erro

de posição correspondente à formação. Em tais casos, o compensador dinâmico será aquele proposto em [23], quando se tratar de robôs terrestres tipo uniclo, ou em [17], quando se tratar de robôs aéreos/*drones*.

1.3 O controlador de cinemática inversa

A técnica de controle que será utilizada no restante do texto, é a técnica de cinemática inversa [24, 25, 26, 27], a qual consiste, genericamente falando, em projetar um controlador não linear que compensa a cinemática não linear do veículo, substituindo-a por uma cinemática linear. Conseqüentemente, a equação característica do sistema que mostra a evolução no tempo do erro de posição, quando a malha é fechada usando tal controlador, torna-se uma equação diferencial ordinária linear e homogênea, para a qual a solução é um erro que tende exponencialmente a zero, desde que os ganhos do controlador sejam positivos e não nulos.

1.3.1 Seguimento de trajetória

De uma forma geral, considerando $\mathbf{x}(t) = (x(t), y(t))$ como a posição instantânea do veículo, o qual se move com a velocidade $\dot{\mathbf{x}}(t) = (\dot{x}(t), \dot{y}(t))$, e considerando $\mathbf{x}_d(t) = (x_d(t), y_d(t))$ como a posição instantânea desejada do veículo, a qual se move com a velocidade $\dot{\mathbf{x}}_d(t) = (\dot{x}_d(t), \dot{y}_d(t))$, e sabendo que o erro de posição instantâneo é $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}$, a lei de controle baseada em cinemática inversa, para este caso, que é o que se caracteriza como um seguimento de trajetória, pode ser escrita como

$$\mathbf{v}_{com} = \mathbf{A}^{-1}\{\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}}\}, \quad (1.1)$$

no qual \mathbf{K}_p é uma matriz diagonal positiva definida, \mathbf{A} é a matriz de cinemática direta do veículo e \mathbf{v}_{com} é o vetor de velocidades comandadas.

Supondo um seguimento perfeito de velocidade, ou seja, $\mathbf{v}_{real} = \mathbf{v}_{com}$, e usando o modelo cinemático do veículo, obtém-se que

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{v}_{real} = \mathbf{A}\mathbf{v}_{com} = \mathbf{A}\mathbf{A}^{-1}\{\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}}\} = \dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}}, \quad (1.2)$$

donde se obtém, passando $\dot{\mathbf{x}}$ para o lado direito da igualdade,

$$\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0},$$

o que resulta em

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0}. \quad (1.3)$$

Para provar a estabilidade assintótica do sistema de malha fechada, utilizando o controlador na Equação (1.1), seja a função candidata de Lyapunov

$$V(\tilde{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{x}}^T\tilde{\mathbf{x}} > \mathbf{0}, \forall \tilde{\mathbf{x}} \neq \mathbf{0}, \quad (1.4)$$

para a qual a primeira derivada é

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}) = \tilde{\mathbf{x}}^T\dot{\tilde{\mathbf{x}}}.$$

Tendo em conta a Equação (1.3), resulta que

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}) = \tilde{\mathbf{x}}^T(-\mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}}) = -\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}} < \mathbf{0},$$

uma vez que \mathbf{K}_p é uma matriz positiva definida, provando que o erro $\tilde{\mathbf{x}} \rightarrow \mathbf{0}$ quando $t \rightarrow \infty$, ou seja, que o erro de posição do robô em relação à trajetória sendo seguida tende assintoticamente para zero.

Da forma definida na Equação (1.1), porém, grandes erros de posição podem fazer com que sejam gerados sinais de controle (velocidades) muito superiores àqueles que o veículo pode desenvolver, o que significa que é conveniente saturar o sinal de controle \mathbf{v}_{com} . Uma maneira de se fazer isso é usando como saturador a função $\tanh(\cdot)$, que é um saturador suave, de forma que a lei de controle baseada em cinemática inversa se torna

$$\mathbf{v}_{com} = \mathbf{A}^{-1}\{\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{L}_s \tanh(\mathbf{L}_s^{-1}\mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}})\}, \quad (1.5)$$

em que \mathbf{L}_s é também uma matriz diagonal positiva definida, que corresponde ao valor saturado da velocidade comandada quando o erro $\tilde{\mathbf{x}}$ é muito grande. Note-se, assim, que selecionando \mathbf{L}_s e \mathbf{K}_p adequadamente, não haverá velocidade comandada que não seja factível para o veículo utilizado. Uma característica importante da função $\tanh(\cdot)$ é que ela é um saturador suave, ou seja, que não apresenta uma comutação brusca entre o valor mínimo e o valor máximo, como seria o caso da função $\text{sign}(\cdot)$. Sobre o comportamento do erro quando o controlador caracterizado pela Equação (1.5) é utilizado, tendo em conta que a função \tanh é uma função ímpar, pode-se mostrar que o erro efetivamente converge para zero, assintoticamente, quando \mathbf{K}_p e \mathbf{L}_s são matrizes diagonais positivas definidas.

Para isso, toma-se a mesma função candidata de Lyapunov definida pela Equação (1.4), cuja primeira derivada é a mesma. Porém, considerando que a equação de malha fechada, agora, é

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{L}_s \tanh(\mathbf{L}_s^{-1} \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{0}, \quad (1.6)$$

se obtém que

$$\dot{V} = -\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{L}_s \tanh(\mathbf{L}_s^{-1} \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}}) < \mathbf{0},$$

tendo em conta que $\tanh(\cdot)$ é uma função ímpar e que \mathbf{L}_s e \mathbf{K}_p são matrizes diagonais positivas definidas, mostrando-se, assim, que o erro de posição do robô em relação à trajetória desejada tende assintoticamente para zero, ou seja, que o sistema em malha fechada é assintoticamente estável.

1.3.2 Posicionamento

Destaque-se que as Equações (1.1) e (1.5) se referem aos comandos de velocidade quando o veículo deve seguir uma trajetória desejada \mathbf{x}_d , situação em que a velocidade desejada é definida pela trajetória, ou seja, é dada por $\dot{\mathbf{x}}_d$. Entretanto, essas equações também se aplicam para o caso de uma tarefa de posicionamento, simplesmente considerando que, nesse caso, a posição desejada \mathbf{x}_d é estática, ou seja, sua velocidade é $\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{0}$.

Em tal caso, a lei de controle na Equação (1.1) se resumiria a

$$\mathbf{v}_{com} = \mathbf{A}^{-1}\{\mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}}\}, \quad (1.7)$$

sendo \mathbf{K}_p uma matriz diagonal positiva definida, \mathbf{A} é a matriz de cinemática direta do veículo e \mathbf{v}_{com} é o vetor de velocidades comandadas. Percebe-se, também, que a mesma análise de estabilidade pode ser feita, e a conclusão é que o sistema de malha fechada utilizando tal controlador é também assintoticamente estável.

Para o caso da lei de controle da Equação (1.5), o resultado seria

$$\mathbf{v}_{com} = \mathbf{A}^{-1}\{\mathbf{L}_s \tanh(\mathbf{L}_s^{-1}\mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{x}})\}, \quad (1.8)$$

em que \mathbf{L}_s e \mathbf{K}_p são matrizes diagonais positivas definidas, \mathbf{A} é a matriz de cinemática direta do veículo e \mathbf{v}_{com} é o vetor de velocidades comandadas. Mais uma vez, a mesma análise de estabilidade pode ser feita, levando à conclusão de que o sistema de malha fechada assim implementado é assintoticamente estável.

1.3.3 Seguimento de caminho

As mesmas Equações (1.1) e (1.5) também podem ser utilizadas para um veículo cumprindo uma tarefa de seguimento de um caminho especificado. Nesse caso, o veículo terá uma velocidade qualquer, definida pelo usuário, mas limitada pela capacidade do veículo e pelos regulamentos vigentes, quando for o caso. Porém, tal velocidade deve ter sempre a direção tangente ao caminho sendo seguido, para que o robô não se desvie do caminho sendo percorrido [6].

Conseqüentemente, seja um caminho definido por $C(s) = (x(s), y(s))$, em que s é a chamada abcissa curvilínea. Nesse caso, a velocidade do robô ao longo do caminho deve ser tal que sua intensidade é o valor arbitrário V_d , e sua direção será dada por

$$\theta = \arctg\left(\frac{\frac{dy}{ds}}{\frac{dx}{ds}}\right), \quad (1.9)$$

para cada ponto do caminho. Nesse caso, a lei de controle na Equação (1.5) seria alterada para

$$\mathbf{v}_{com} = \mathbf{A}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} V_d \cos \theta & V_d \sin \theta \end{bmatrix}^T + \mathbf{L}_s \tanh(\mathbf{L}_s^{-1} \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}}) \right\}, \quad (1.10)$$

na qual, novamente, as matrizes \mathbf{L}_s e \mathbf{K}_p são matrizes diagonais positivas definidas e \mathbf{A} é a matriz de cinemática direta do robô. Um detalhe importante é que quando o veículo está longe do caminho a ser seguido se pode adotar $V_d = 0$, e deixar o robô se posicionar num ponto do caminho, que pode ser o ponto mais próximo dele, como em [6], para seguir o caminho a partir de tal ponto. Isto, porém, não é mandatório, ou seja, pode-se simplesmente utilizar $V_d \neq 0$ mesmo quando o robô está fora do caminho.

Consequentemente, o controlador baseado em cinemática inversa é bastante genérico e, por isso, é aqui utilizado. Para concluir este capítulo, a Figura 1.3 ilustra, na forma de diagrama de blocos, o controlador baseado em cinemática inversa para o caso de um seguimento de trajetória e utilizando a lei de controle na Equação (1.5).

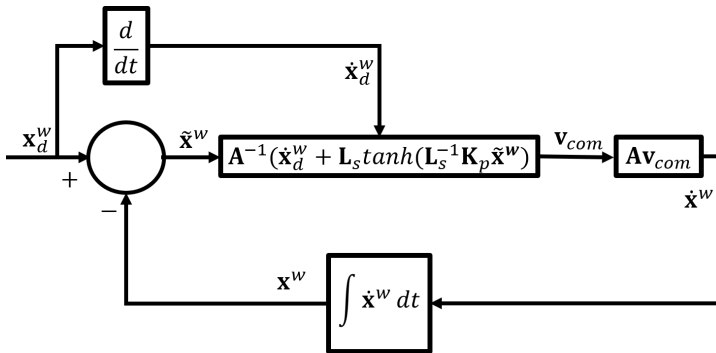


Figura 1.3 – Diagrama de blocos correspondente ao controlador de cinemática inversa para o caso de seguimento de trajetória, quando se usa o saturador $\tanh(\cdot)$. O super índice w se refere a coordenadas globais. Note-se que o bloco mais à direita corresponde ao modelo cinemático do robô e, numa situação real, seria substituído pelo robô.

O livro aborda o controle de sistemas multirroboês (SMR), ou seja, vários robôs cooperando para cumprir uma tarefa. Um bom exemplo é a entrega de pacotes por drones. O drone de entrega decola de um veículo terrestre, e nele volta a pousar após entregar o pacote.

O fato é que a atuação cooperativa de vários robôs se mostra como solução viável para várias aplicações, exigindo o conhecimento de técnicas para controlar um sistema multirroboês.

Neste livro três dessas técnicas são abordadas: a estrutura líder-seguidor, a estrutura virtual, e o controle baseado em comportamentos. Neste último caso, a comutação entre comportamentos é baseada no espaço nulo da matriz jacobiana associada a um comportamento de maior prioridade, criando-se uma sequência decrescente de prioridades para os comportamentos. Exemplos simulados e experimentais em escala de laboratório são mostrados, ilustrando cada caso.



www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

Controle de sistemas multirroboôs

Mário Sarcinelli Filho

ISBN: 9788521221500

Páginas: 120

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2023
