

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA SEGUIMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO UM VANT

VITOR ABREU MARTINS*, ELIETE MARIA DE OLIVEIRA CALDEIRA†, MÁRIO SARCINELLI-FILHO†

**Instituto Federal do Espírito Santo
Guarapari, Espírito Santo, Brasil*

*†Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil*

Emails: vitoram1234@gmail.com, eliete@ele.ufes.br, mario.sarcinelli@ufes.br

Abstract— This article presents a supervisory system based on vision developed to a miniaturized unmanned aerial vehicle (UAV), which sends parameters to the dynamic controller of the UAV, in order to allow it to follow transmission lines. The transmission lines are identified by a camera on board pointed downwards. A nonlinear controller based on inverse dynamics is used, using linearization technique of partial feedback states to control the UAV dynamics. Experiments results are shown, which validate the proposed structure.

Keywords— arial robotics, computer vision.

Resumo— Este artigo apresenta um sistema supervisório baseado em visão desenvolvido para um veículo aéreo não tripulado (VANT) miniatura, que envia parâmetros para o controlador dinâmico do VANT permitindo que o mesmo consiga acompanhar linhas de transmissão. As linhas de transmissão são identificadas por uma câmera a bordo apontada para baixo. É utilizado um controlador não linear baseado em dinâmica inversa, utilizando a técnica de linearização por retroalimentação parcial de estados para controlar a dinâmica do VANT. Resultados de experimentos são apresentados, os quais validam a estrutura proposta.

Palavras-chave— robótica aérea, visão computacional

1 Introdução

Nas últimas décadas veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações, tanto militares quanto civis. Os VANTs se destacam em tarefas de inspeção de grandes áreas ou regiões hostis, tais como em agricultura de precisão, em gerenciamento de riscos naturais e missões táticas em campos de combate, por exemplo (Kendoul et al., 2010; Duan and Liu, 2010).

Outra possível aplicação dos VANTs é utilizá-los na inspeção de linhas de transmissão. Atualmente, essa inspeção é realizada utilizando helicópteros tripulados voando próximos às linhas, e com um eletricitista que literalmente caminha sobre a linha de transmissão realizando inspeção visual e térmica, como pode ser visto na Figura 1. Portanto, esta é uma tarefa de alta periculosidade e bastante custosa (Lima II et al., n.d.).

Para realizar a inspeção o VANT tem que ser capaz de identificar a linha de transmissão e segui-la. Em (Rangel et al., 2009) a inspeção da linha é reali-



Figura 1: Inspeção de linha de transmissão de energia elétrica usando um helicóptero tripulado.

zada através de um avião miniatura não tripulado. O controle do VANT é realizado por um piloto embarcado que contém as rotas previamente estabelecidas por um sensor GPS. Porém, nem sempre a localização dos postes do sistema de transmissão de energia é conhecida, tornando a utilização de GPS uma solução restrita. Já em (Berger et al., 2012) essa tarefa é realizada através de uma estrutura de controle em cascata, utilizando sensores convencionais e informação visual. Porém, as linhas de transmissão não são formadas por apenas um segmento de linha, uma vez que elas podem ter o ângulo de direção alterado nos postes ou torres de sustentação. De fato, do ponto de vista da imagem capturada pelo VANT, a linha de transmissão é constituída de vários conjuntos de segmentos de linhas, em que as linhas se aproximam ou se afastam, dependendo da diferença de altitude, segmentos de linha esses conectados em pontos específicos. Em outras palavras, vista de cima, uma linha de transmissão de energia elétrica pode ser entendida como um conjunto de caminhos retos, constituindo um caminho linear por partes, onde cada linha do conjunto pode aparecer mais próxima ou mais distante das outras, dependendo da altitude relativa.

Este projeto propõe solucionar o problema de seguir uma linha de transmissão com a utilização de um VANT dotado de uma câmera a bordo apontada para baixo, para realizar a localização em relação à linha de transmissão, e de um supervisório que divide a tarefa em três etapas, a saber, seguir cada trecho da linha com velocidade e altitude constante, se posicionar no encontro de dois trechos sucessivos da linha que tenham inclinações diferentes na imagem, e corrigir seu ângulo de guinada para seguir o próximo segmento.

O supervisor, então, dependendo do estado que se encontra e da localização do VANT envia parâmetros para um controlador não linear de dinâmica inversa. O VANT escolhido para esse projeto é um quadrimotor do modelo AR.drone 2.0.

Para tratar desses tópicos, o artigo foi estruturado, a partir deste ponto, da seguinte forma: a Seção 2 descreve o controlador dinâmico utilizado pelo supervisor, enquanto a Seção 3 apresenta como foi implementado o sistema de visão para a detecção das linhas e a localização do VANT em relação às linhas de transmissão. Nessa seção também são apresentados alguns resultados de experimentos. Já a Seção 4 descreve o sistema de controle desenvolvido nesse projeto, enquanto a Seção 5 apresenta resultados de experimentos, para validar o sistema de controle, e comentários sobre os resultados. Finalmente, na Seção 6 são feitas as considerações finais do trabalho, e apresentadas ideias para dar continuidade ao mesmo.

2 O Controlador Dinâmico Utilizado

Para a realização de um voo autônomo, é necessário juntar-se a modelagem do veículo e um controlador. Para o entendimento do funcionamento do sistema como um todo, esta sessão apresenta o modelo e o controlador utilizados para o quadrimotor do modelo AR.drone 2.0, descritos em (Vago Santana et al., 2014). A modelagem utilizada considerou os controladores internos de tal modelo, já presente em seu *firmware*. Já o controlador utilizado é um controlador não-linear de dinâmica inversa para seguimento de trajetória ou posicionamento para o AR.drone 2.0.

Em (Vago Santana et al., 2014) foi desenvolvido um modelo para representar a dinâmica do AR.drone 2.0 em seu próprio eixo de coordenadas, com o centro de massa como ponto de interesse para o controle, através da análise da resposta do mesmo com base nos controladores internos já presentes. O modelo é descrito pelas equações

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \mathbf{K}_1 u_{v_x} - \mathbf{K}_2 v_x \\ \dot{v}_y = \mathbf{K}_3 u_{v_y} - \mathbf{K}_4 v_y \\ \dot{z} = \mathbf{K}_5 u_z - \mathbf{K}_6 \dot{z} \\ \dot{\psi} = \mathbf{K}_7 u_{\psi} - \mathbf{K}_8 \dot{\psi}, \end{cases} \quad (1)$$

onde $\dot{v}_x$ e $\dot{v}_y$ representam acelerações lineares em relação aos eixos x e y no referencial do quadrimotor, enquanto $\dot{z}$ representa a aceleração linear com respeito ao eixo z e $\dot{\psi}$ representa a aceleração angular com respeito ao eixo z no referencial inercial, devido ao *firmware* já compensar a influência dos ângulos θ e ϕ . Os parâmetros $\mathbf{K}_1, \dots, \mathbf{K}_8$ são constantes de proporcionalidade a serem identificadas experimentalmente. Os comandos de movimento do AR.drone 2.0 são u_{v_x}, u_{v_y}, u_z e u_{ψ} . Tais comandos são normalizados, assim cada elemento do vetor de sinais de controle $\mathbf{u} = [u_z \ u_{\psi} \ u_{v_x} \ u_{v_y}] \in [-1, +1]$, sendo que u_z representa um comando de velocidade de deslocamento

linear sobre o eixo z ; u_{ψ} representa um comando de velocidade angular em torno do eixo z ; u_{v_y} representa um comando de inclinação em relação a x , o que indiretamente representa um comando de velocidade linear relacionado ao eixo y , e por isso que é chamado de u_{v_y} ; u_{v_x} representa um comando de inclinação em relação a y , o que indiretamente representa um comando de velocidade linear relacionado ao eixo x , e por isso que é chamado de u_{v_x} .

O modelo utilizado não é uma representação completa da dinâmica do quadrimotor, porém é uma aproximação suficiente, o que é comprovado em (Vago Santana et al., 2014), onde se compara dados experimentais coletados em voo com dados simulados com o modelo.

O controlador proposto é capaz de realizar posicionamento e seguimento de trajetória de um AR.drone 2.0. Ou seja, um controlador capaz de levar o quadrimotor da posição e orientação $\mathbf{X} = [x, y, z, \psi]$ para os valores desejados $\mathbf{X}_d = [x_d, y_d, z_d, \psi_d]$, onde $\mathbf{X}_d$ pode ser uma função no tempo, caracterizando um seguimento de trajetória, ou uma constante, caracterizando posicionamento. O modelo do quadrimotor, Equação 1, agora no referencial global, torna-se

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{U} - \mathbf{f}_2 \dot{\mathbf{X}}, \quad (2)$$

onde

$$\ddot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{v_x} \\ u_{v_y} \\ u_z \\ u_{\psi} \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Partindo da Equação 2 a lei de controle adotada é

$$\mathbf{U} = \mathbf{f}_1^{-1} \cdot (\mathbf{v} + \mathbf{f}_2 \cdot \dot{\mathbf{X}}), \quad (4)$$

onde

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{X}}_d + \kappa_p \cdot \ddot{\mathbf{X}} + \kappa_d \cdot \dot{\mathbf{X}}, \quad (5)$$

sendo

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X} = [x_d - x \quad y_d - y \quad z_d - z \quad \psi_d - \psi]^T \quad (6)$$

o erro de seguimento, e sendo κ_p e κ_d as matrizes diagonais de ganho com valores sempre positivos e não nulos. Em (Vago Santana et al., 2014) também é provada a estabilidade do controlador utilizando a teoria de Lyapunov.

3 Sistema de Visão

O AR.drone 2.0 já vem com uma câmera a bordo apontada para baixo e as imagens adquiridas são de fácil acesso. Simplificando, para o caso em que a câmera está no centro de massa do veículo, os seus eixos se tornam os mesmos que os do quadrimotor, assim como as matrizes de rotação e translação para o sistema inercial.

Para detectar as linhas nas imagens capturadas pela câmera a bordo do quadrimotor, foi utilizada a

transformada de Hough, por ser um método amplamente utilizado e muito efetivo para a detecção de linhas retas em imagens. Foram realizados experimentos utilizando a transformada de Hough, para validar o método na detecção da linha a ser seguida. Nesses experimentos o AR.drone 2.0 foi colocado para sobrevoar um caminho feito com tiras de papel no chão, sendo a largura do caminho variável para representar um possível alicie e declive das linhas de transmissão. As bordas do papel com o chão representam as linhas de transmissão e devem ser identificadas nas imagens. Durante os experimentos as bordas do papel foram detectadas, porém foram detectados segmentos de retas a mais, que são divididos em dois padrões, segmentos que não pertencem às linhas foram detectados, e mais de um segmento sendo detectado para a mesma linha.

Sendo o padrão das linhas de transmissão conhecido, é possível criar um classificador que analise os segmentos de reta encontrados pela transformada de Hough e que retorne apenas um segmento de reta para cada linha de transmissão da imagem, semelhante ao trabalho apresentado em (Li et al., 2010). O padrão das linhas de transmissão é que elas aparecem nas imagens como um número fixo de segmentos de reta, e cada segmento de reta possui inclinação próxima dos outros segmentos de reta, e deve estar a uma certa distância dos outros. Essa distância, em pixels, depende da altura relativa da câmera em relação às linhas. Um filtro foi desenvolvido para eliminar os segmentos extras da seguinte forma, juntar os vários segmentos de reta que representam a mesma linha de transmissão e eliminar as linhas avulsas que não pertencem a nenhuma linha de transmissão. O filtro foi aplicado nas imagens dos experimentos anteriores e o resultados podem ser vistos na Figura 2. Como resultado final todas as linhas no chão foram representadas por apenas um segmento de reta, e todas os segmentos de reta representam uma e apenas uma linha.

Com as linhas de transmissão sendo detectadas na imagem, o posicionamento e a orientação relativos do VANT em relação às linhas foi encontrado. Para isso foi utilizando o modelo de câmera *Pinhole* com os parâmetros intrínsecos da câmera encontrados de maneira empírica, a distância em metros entre as linhas, um valor fixo e também conhecido, e as matrizes de rotação entre os eixos da câmera e da linha.

4 Adaptação do Controlador para Seguir Linha

O controlador dinâmico desenvolvido em (Vago Santana et al., 2014) pode ser utilizado para cumprir as



Figura 2: Aplicação do filtro sobre os segmentos de reta detectados.

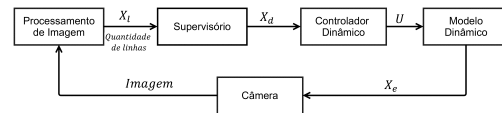


Figura 3: Diagrama de blocos do VANT com o sistema supervisor desenvolvido.

tarefas de posicionamento do robô e seguimento de linhas. Esse projeto propôs desenvolver uma estratégia de controle que, utilizando a informação do processamento das imagens da câmera, o posicionamento e a orientação do VANT em relação às linhas de transmissão e a quantidade de linhas de transmissão presentes nas imagens, envie os parâmetros de entrada para o controlador dinâmico, e tal controlador dinâmico leva o VANT para os valores desejados. O diagrama de blocos da Figura 3 mostra o sistema proposto completo, sendo que X_l representa a posição e a orientação do VANT em relação às linhas, X_d representa sua posição tridimensional, sua orientação e sua velocidade frontal desejados, U contém os sinais de controle enviados pelo controlador ao VANT, e X_e representa a posição e a orientação do VANT no referencial global. O sistema supervisor sempre tenta manter a velocidade lateral do VANT em zero, enquanto os ângulos de arfagem e guinada desejados vão ser definidos pelo controlador dinâmico utilizado.

Sabendo que as linhas de transmissão seguem o padrão de segmentos de linhas retas conectados em pontos específicos, o sistema proposto tem a estrutura representada na Figura 4.

Após ter os parâmetros inicializados, o supervisor segue para a parte "Seguimento de linha" onde o robô tem que seguir o segmento de linha detectado com uma velocidade constante e com ângulo de guinada igual à inclinação da linha. Ou seja, sua orientação deve coincidir com a direção da linha. Nessa etapa a velocidade frontal deve ser constante e a velocidade lateral deve ser nula. No caso do quadrimotor estar deslocado em relação à linha, ele deverá se aproximar da linha variando o seu ângulo de guinada. O ângulo de guinada a ser estabelecido como referência é obtido partindo-se do ponto da linha mais próximo do quadrimotor (P_1), conforme ilustra a Figura 5. Em seguida é encontrado um ponto P_2 a certa distância de P_1 (no caso 50 cm) que também pertence à linha (tomando cuidado para que P_2 esteja à frente de P_1). O ângulo que o quadrimotor deve seguir é o ângulo entre sua posição atual e P_2 , ou seja, o ângulo ψ_d mostrado na



Figura 4: Fluxograma adotado para o cumprimento da tarefa de seguimento de linha.

Figura 5. Este procedimento é repetido a cada ciclo de amostragem, de forma que a distância em relação à linha tende a 0, levando $\tan(\psi_d)$ a 0, resultando no robô seguindo a linha com o mesmo ângulo. Outra possibilidade seria o quadrimotor seguir a linha no sentido contrário. Note-se que o sentido de seguimento da linha depende apenas de onde está o ponto P_2 , à frente ou atrás de P_1 .

Na imagem aparecerão duas linhas com inclinações diferentes, quando o quadrimotor se aproximar de uma torre de suporte de linha de transmissão, caso a direção do novo segmento seja diferente daquela da atual. Ao encontrar a outra linha o sistema de controle muda para a tarefa "Posicionamento", e o robô passa a ser comandado para parar sobre o ponto de encontro das duas linhas detectadas. Nessa parte, as coordenadas do ponto comum às linhas são encontradas e enviadas como referência para o controlador da dinâmica do quadrimotor, que o leva para o ponto desejado. Nesse caso, o ângulo de guinada é calculado da mesma forma que durante a etapa "Seguimento de Linha", não levando em consideração o ponto de encontro. Isto é feito desta forma porque como o ponto vai estar muito próximo do VANT qualquer erro ao calcular a posição do ponto de encontro ou de posicionamento do VANT resultaria numa grande variação do ângulo desejado. Mais ainda, como o ponto de encontro se localiza sobre a linha, seguindo a linha não resultará num grande erro de posicionamento. Caso algum dos dois segmentos não seja detectado enquanto o quadrimotor não alcançar o ponto de destino, o sistema considera o ponto anteriormente calculado como ponto destino.

Quando o quadrimotor se posiciona no ponto de encontro das linhas, o sistema muda a tarefa para "Ajuste de Guinada". Nessa etapa o robô tem que girar em torno do próprio eixo Z, e ajustar seu ângulo de guinada para se igualar à orientação da nova linha a ser seguida. Ao passar da segunda etapa para a terceira o ângulo do próximo segmento é salvo, passando a ser a nova referência para o ângulo de guinada do quadrimotor. A terceira etapa é finalizada quando o quadrimotor tem seu ângulo de guinada igual à orientação do próximo segmento de linha, e então o sistema volta para a primeira etapa, seguindo o novo segmento. Foram tomadas as devidas precauções para evitar que o segmento antigo, ainda presente na imagem, seja confundido com um novo segmento e que o quadrimotor faça o caminho contrário, e assim fique preso em um

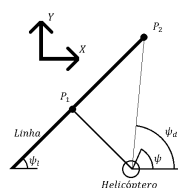


Figura 5: Aproximação do quadrimotor à linha a ser seguida.

só segmento de linha, sem passar para os seguintes.

5 Resultados

Para validar o sistema desenvolvido foram realizados experimentos com o AR.drone 2.0. Foi utilizado um *software* livre em openCV, no qual foi adicionado o sistema de visão e o supervisor desenvolvidos. Nos experimentos o quadrimotor tinha que completar um caminho desenhado no chão, utilizando fitas de papel, sendo que as bordas do papel representam as linhas a serem seguidas. O caminho a ser seguido pelo quadrimotor durante o experimento é mostrado na Figura 6. O caminho é definido por duas linhas, e se inicia com as linhas paralelas ao eixo y. Após 4,9 m a linha tem sua inclinação alterada em 90° para a direita, seguindo paralela ao eixo x por mais 6,1 m. Um auge e um declive da linha foram representados no experimento por uma variação na largura do caminho, sendo que na troca de inclinação a linha tem a sua largura dobrada, e no final do caminho a sua largura original. Essa variação de largura é interpretada pelo quadrimotor como uma variação de 1,5 m de altura. Esse caminho foi escolhido por apresentar os dois movimentos verticais requeridos pelo quadrimotor, subir e descer, e poder verificar se o quadrimotor para sobre o ponto de encontro e consegue ajustar a sua orientação para seguir a nova linha.

A tarefa é seguir a linha do meio, tendo a orientação semelhante à direção da linha, permanecendo a 1,5 m acima dela. Durante a etapa "Seguimento de Linha" a velocidade de avanço do quadrimotor deve ser de 20 cm/s. O quadrimotor iniciou o experimento no chão, sobre o início do caminho, foi colocado em voo manualmente, e após se estabilizar foi iniciado o programa que realiza o controle do quadrimotor para realizar o seguimento de linha. O ângulo de guinada do quadrimotor coincide com a direção da linha a ser seguida, paralela ao eixo y, e a altura é metade da altura desejada, 0,75 m do chão, condições iniciais essas que foram escolhidas para verificar se o quadrimotor iria completar o caminho com o mínimo de controle humano (apenas decolar e pousar).

O AR.drone 2.0 possui uma característica que não foi incorporada no modelo, o fato do controlador interno conseguir forçar a parada e manter o quadrimotor parado quando os sinais de controle de velocidade tridimensional são nulos. Tal característica será utilizada na etapa "Ajuste de Guinada" para evitar que



Figura 6: Caminho a ser percorrido pelo quadrimotor no experimento.

ele saia do ponto de encontro. Com isso, durante essa etapa o controle de altitude também não será realizado e o quadrimotor ficará parado sobre o mesmo ponto. Ou seja, durante a etapa "Ajuste de Guinada" apenas será controlado o ângulo de guinada. Além disso, como no sistema de controle proposto para o quadrimotor este não deve realizar movimentos laterais, durante todo o experimento o sinal de controle de movimento lateral do quadrimotor será nulo.

Os gráficos da Figura 7 mostram com detalhes os dados de voo do quadrimotor durante o experimento. Nesses gráficos as linhas contínuas representam os valores medidos, as linhas tracejadas em vermelho correspondem aos valores desejados, e as linhas pontilhadas verticais representam as trocas de etapas do controlador. Os valores de velocidade foram medidos pelos sensores internos do próprio AR.drone 2.0, enquanto o ângulo e a altura foram medidos através do processamento das imagens da câmera.

A Figura 7a mostra o ângulo de guinada do quadrimotor em relação à linha a ser seguida. No início tal ângulo é calculado em relação à primeira parte do caminho, paralela ao eixo y, e a partir da etapa "Ajuste de Guinada" passa a ser calculado em relação à segunda parte do caminho, paralela ao eixo x. Essa variação de referencial é representada no gráfico pela variação brusca de 0° para 90° quando a etapa "Ajuste de Guinada" se inicia. Analisando esse gráfico, pode-se perceber que durante a primeira parte do percurso o ângulo foi próximo de zero e quase não sofreu variações. Isso se deve ao fato de que durante o experimento o quadrimotor iniciou seu voo próximo da linha, e portanto não teve que realizar uma grande variação de ângulo para corrigir o seu posicionamento em relação à linha a ser seguida. Na etapa "Ajuste de Guinada" o ângulo é ajustado para seguir a nova linha, e tem seu valor re-

duzido de 90° a 0° . Após o ajustar o ângulo, devido a estar mais afastado da linha que no início da simulação, por causa de variações indesejadas das velocidades, o ângulo de guinada teve que sofrer alterações maiores.

A Figura 7b mostra a altitude em relação à linha a ser seguida, medida pela visão, traçada em azul, em comparação com a altura desejada (1,5 m), correspondente à linha preta, e com a altura medida pelo ultrassom, representada pela linha verde. Pode-se perceber que no início o quadrimotor alcançou a altura desejada e se manteve próximo a ela durante todo o percurso. Durante a etapa "Ajuste de Guinada" a altura não foi medida pelas imagens, mas o sensor à base de ultrassom a bordo do quadrimotor confirma que ela permaneceu praticamente constante nessa etapa. Ao voltar a seguir a linha, a altura apresenta uma variação positiva, o que se deve ao fato do quadrimotor estar adiantado no percurso, e como nessa etapa a largura da linha está se reduzindo, a altura do quadrimotor em relação à linha aumenta. Mas ao analisar pela altura medida pelo sensor ultrassônico se percebe que a variação de altura não foi tão expressiva. Pela curva da altura medida pelo sensor ultrassônico se nota que o quadrimotor se elevou a até quase 3 m e depois retornou para 1,5 m, como era desejado.

A Figura 7c permite a análise da velocidade de avanço, e nela se percebe que o controlador conseguiu levar a velocidade de avanço para o valor desejado (20 cm/s) durante a etapa "Seguimento de Linha". Nessa etapa aconteceram algumas sobrelevações da velocidade, mas sempre voltando para valor desejado. Ao trocar de etapa, quando da detecção da segunda linha na imagem, a velocidade de avanço cai para próximo de zero, e então o veículo altera a sua orientação para coincidir com a da próxima linha. No início da etapa "Ajuste de Guinada", a velocidade cai até 0 cm/s, porém na metade da etapa a velocidade cresce. Esse comportamento não é esperado e acaba retirando o quadrimotor do ponto de encontro das linhas. Porém, mesmo com esse evento o quadrimotor consegue completar o percurso. Já a Figura 7d mostra a velocidade lateral do quadrimotor. Nela é fácil perceber que aconteceram uma série de variações de velocidade indesejadas. Tais variações são devidas aos

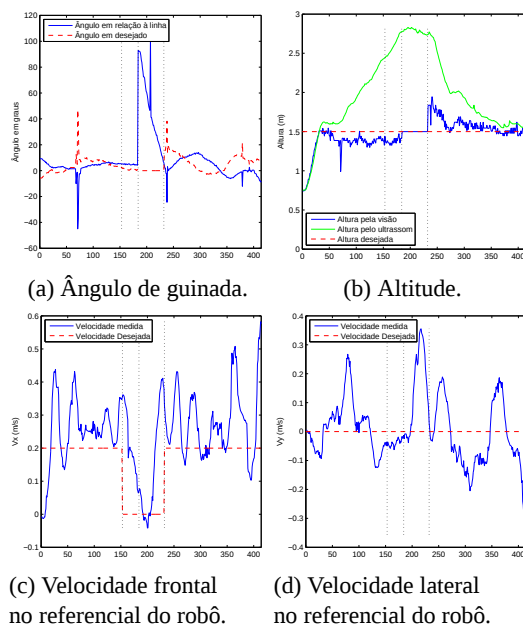


Figura 7: Gráficos correspondentes ao experimento com o quadrimotor.

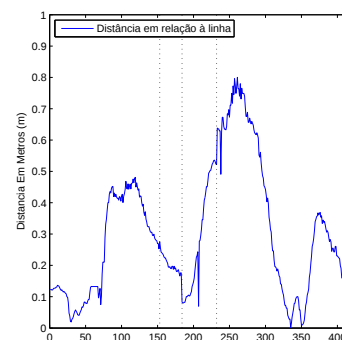


Figura 8: Distância horizontal entre o quadrimotor e a linha sendo seguida no experimento.

erros de *drift* que ocorrem na IMU disponível a bordo do veículo, causando seu deslocamento nas direções x e y , principalmente. Esse fato acaba afastando o quadrimotor da linha a ser seguida, mas mesmo com essas variações o sistema consegue completar o percurso.

Por fim, a Figura 8 mostra a distância horizontal entre o quadrimotor e a linha média sendo seguida. O quadrimotor inicia seu voo aproximando-se da linha, porém devido às variações indesejadas na velocidade lateral (ver Figura 7d), o quadrimotor acaba se afastando da linha. Mas o sistema de controle faz com que o quadrimotor se aproxime da linha novamente, corrigindo esses deslocamentos, e com isso o quadrimotor consegue completar o percurso com sucesso.

6 Observações Finais e Trabalhos Futuros

Este trabalho propôs um sistema de controle para um quadrimotor miniatura, com o objetivo de seguir segmentos de linha com direções diferentes conectados um ao outro, formando um caminho contínuo por partes, utilizando visão para encontrar a posição e a orientação do robô em relação à linha pelas imagens de uma câmera disponível a bordo veículo, voltada para baixo. Os segmentos têm suas larguras variadas durante o percurso, e o quadrimotor deve ajustar a altitude para que a largura na imagem permanecesse constante. Para realizar a tarefa foi utilizado o controlador não linear baseado em dinâmica inversa desenvolvido em (Vago Santana et al., 2014), para controlar a dinâmica do quadrimotor, e um sistema supervisor para definir os parâmetros de entrada do controlador, que dependem da etapa da tarefa que o quadrimotor estiver executando. No caso, a tarefa foi dividida em três sub-tarefas, a saber, seguimento de linha, que corresponde ao seguimento efetivo de um trecho linear do caminho sendo percorrido, posicionamento, que corresponde à tarefa de posicionar-se no ponto de junção de dois segmentos de linha sucessivos, e ajuste de guinada, que corresponde a orientar-se adequadamente para seguir o próximo segmento de linha. O desempenho do sistema desenvolvido foi comprovado através de experimentos, onde se observaram bons resultados.

Como trabalhos futuros, propõe-se implementar uma fusão sensorial utilizando as imagens da câmera embarcada, as medidas fornecidas pelos sensores inerciais a bordo do veículo e dados fornecidos por um receptor de GPS. Além de fornecer informações de posicionamento e orientação mais precisas, este sistema baseado na fusão de dados também será útil nas situações em que o VANT eventualmente perder a imagem da linha de transmissão. Bastaria, por exemplo, que a linha fosse caracterizada por suas coordenadas GPS. Ele poderia usar informações do módulo de GPS apenas, podendo reposicionar-se para readquirir a visão da linha. Outra sugestão é utilizar cabos e postes ao invés de fitas de papel, para representar a linha de transmissão. Essa mudança permitiria ajustar o sistema de visão para uma situação mais próxima da realidade, e utilizar a detecção do poste para auxiliar na mudança

de etapas do sistema supervisor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - e à FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – pelo apoio financeiro ao projeto. Eles também agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, do Ministério da Educação, pelo apoio financeiro adicional concedido, na forma da bolsa de Mestrado de Vitor Abreu Martins.

Referências

- Berger, C., Sarapura, J., Jordán, M. and Carelli, R. (2012). Control servovisual de un cuadrirotor en seguimiento de líneas, *Anales de las VII Jornadas Argentinas de Robótica (JAR 2012)*, Vol. 1, Olavarria, Buenos Aires, Argentina.
- Duan, H. and Liu, S. (2010). Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: Current status and prospects, *Science China, Technological Sciences* **53**(5): 1349–1355.
- Kendoul, F., Yu, Z. and Nonami, K. (2010). Guidance and nonlinear control system for autonomous flight of minirotorcraft unmanned aerial vehicles, *Journal of Field Robotics* **27**(3): 311–334.
- Li, Z., Liu, Y., Walker, R., Hayward, R. and Zhang, J. (2010). Towards automatic power line detection for a uav surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved hough transform, *Machine Vision and Applications* **21**(5): 677–686.
- Lima II, E. J., Bomfim, M. H., Bracarense, A. Q., Gontijo, R. A., Mourão, M., Almeida, C. V., Barreto, A. and Reis, M. A. (n.d.). Robô autônomo para inspeção de linhas de alta tensão.
- Rangel, R. K., Kienitz, K. H. and Brandão, M. P. (2009). Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados, *3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control ocorrido entre*, pp. 14–16.
- Vago Santana, L., Brandao, A. S., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2014). A trajectory tracking and 3d positioning controller for the ar. drone quadrotor, *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*, IEEE, pp. 756–767.