

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Gustavo Rípoli

**Medição do Ângulo de Deflexão de Superfícies de
Controle Utilizando Marcadores Fiduciais em Tempo Real**

São Carlos

2025

Gustavo Rípoli

Medição do Ângulo de Deflexão de Superfícies de Controle Utilizando Marcadores Fiduciais em Tempo Real

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Afonso Angélico

São Carlos
2025

I authorize the full or partial reproduction and dissemination of this work, by any conventional or electronic means, for study and research purposes, provided that the source is properly cited.

Cataloging-in-publication data prepared by the Prof. Sérgio Rodrigues Fontes Library and the Communication and Marketing Office at EESC-USP, with information provided by the author.

R588m

Rípoli, Gustavo

Measurement of the Deflection Angle of Control Surfaces Using Real-Time Fiduciary Markers / Gustavo Rípoli ; advisor Ricardo Angélico. -- São Carlos, 2025.

51 p.

Postgraduate Specialization in Production Engineering -- São Carlos School of Engineering of University of São Paulo, 2025.

1. ArUco. 2. Computer Vision. 3. Angular measure. I. Ricardo, Angélico, advisor. II. Título.

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Sérgio Rodrigues Fontes
e pelo Serviço de Comunicação e Marketing da EESC-USP,
com dados inseridos pelo(a) autor(a).

R588m

Rípoli, Gustavo

Medição do Ângulo de Deflexão de Superfícies de Controle Utilizando Marcadores Fiduciais em Tempo Real / Gustavo Rípoli ; orientador Ricardo Angélico. -- São Carlos, 2025.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Especialização em Sistemas Aeronáuticos -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.

1. ArUco. 2. Visão Computacional. 3. Medição Angular.
I. Angélico, Ricardo, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato(a): Gustavo Rípoli

Título do Trabalho: Medição do Ângulo de Deflexão de Superfícies de Controle Utilizando Marcadores Fiduciais em Tempo Real

Data da defesa: 17/12/2025

Comissão julgadora

Avaliador	Resultado (nota)
Ricardo Afonso Angélico (orientador)	7,5
Igor Paganotto Zago	7,5

Resultado final: **Aprovado**

Coordenador do Curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos
Prof. Associado **Jorge Henrique Bidinotto**

Vice-coordenador do Curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos
Prof. Associado **Hernán Darío Cerón Muñoz**

RESUMO

A medição precisa dos ângulos de deflexão de superfícies de controle de aeronaves é fundamental para ensaios em solo, certificação e manutenção de sistemas de controle de voo. Os métodos tradicionais, como inclinômetros digitais e potenciômetros rotativos, apresentam limitações relacionadas ao custo, complexidade de instalação e necessidade de contato físico com a superfície. Este trabalho propõe o desenvolvimento e validação de um método não invasivo, de baixo custo e em tempo real para medição de ângulos de deflexão utilizando marcadores fiduciais do tipo ArUco e técnicas de visão computacional. O sistema baseia-se na detecção automática de marcadores fixados na estrutura fixa da asa e na superfície de controle móvel, seguida da estimação de pose 6DoF (seis graus de liberdade) de cada marcador e do cálculo da orientação relativa entre eles. Foram realizados ensaios experimentais para avaliar a precisão do método e identificar suas limitações em função de variáveis ambientais, tais como luminosidade, ângulo de visada da câmera, distância e oclusões. Os resultados demonstraram que o método proposto é capaz de fornecer medições com precisão subpixel, apresentando erros médios inferiores a 1° em condições controladas. A análise comparativa com métodos tradicionais evidenciou vantagens significativas em termos de custo-benefício, facilidade de implementação e capacidade de fornecer feedback visual em tempo real. Conclui-se que o método proposto é viável para aplicações práticas em ensaios em solo e manutenção de aeronaves, representando uma alternativa tecnicamente eficaz e economicamente acessível aos sistemas convencionais.

Palavras-chave: Superfícies de controle. Marcadores fiduciais. ArUco. Visão computacional. Medição angular.

ABSTRACT

Accurate measurement of deflection angles on aircraft control surfaces is fundamental for ground and flight testing, certification, and maintenance of flight control systems. Traditional methods, such as digital inclinometers and rotary potentiometers, have limitations related to cost, installation complexity, and the need for physical contact with the surface. This work proposes the development and validation of a non-invasive, low-cost, real-time method for measuring deflection angles using ArUco fiducial markers and computer vision techniques. The system is based on the automatic detection of markers fixed to the fixed wing structure and the movable control surface, followed by the estimation of the 6DoF (six degrees of freedom) pose of each marker and the calculation of the relative orientation between them. Experimental tests were carried out to evaluate the accuracy of the method and identify its limitations as a function of environmental variables, such as luminosity, camera viewing angle, distance, and occlusions. The results demonstrated that the proposed method is capable of providing measurements with subpixel precision, presenting average errors of less than 1° under controlled conditions. Comparative analysis with traditional methods revealed significant advantages in terms of cost-effectiveness, ease of implementation, and ability to provide real-time visual feedback. It is concluded that the proposed method is viable for practical applications in ground and flight testing and aircraft maintenance, representing a technically effective and economically accessible alternative to conventional systems.

Keywords: Control surfaces. Fiducial markers. ArUco. Computer vision. Angular measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de tipo de marcadores fiduciais.	26
Figura 2 – Exemplo de marcadores fiduciais ArUco.	27
Figura 3 – Exemplo de visualização dos parâmetros Intrinsicos e Extrinsicos.	29
Figura 4 – Transdutor utilizado para a medição do ângulo de deflexão da superfície de comando em uma aeronave.	30
Figura 5 – Exemplo de inclinômetro digital utilizado para a medição do ângulo de deflexão da superfície de comando.	30
Figura 6 – Exemplo de sistema de medição de ângulo a laser.	31
Figura 7 – Câmera utilizada para aquisição das imagens.	34
Figura 8 – Marcadores com seus respectivos IDs utilizados para as medições.	34
Figura 9 – Aeronave Aermacchi MB326, também conhecida como AT-26 Xavante.	34
Figura 10 – Marcadores fixados sobre o Aileron.	35
Figura 11 – Posicionamento dos Marcadores, Câmera e Inclinômetro de Referência.	35
Figura 12 – Exemplo de identificação dos Marcadores pelo Algoritmo.	36
Figura 13 – Comparação entre a referência e o método proposto.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de medições de ângulo de deflexão	37
Tabela 2 – Comparação entre métodos de medição de deflexão	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

6DoF	Six Degrees of Freedom
PnP	Perspective-n-Points
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
USB	Universal Serial Bus
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
RAM	Random Access Memory
ARINC	Aeronautical Radio, Incorporated
CAN	Controller Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Letra grega Theta
ϕ	Letra grega Phi
ψ	Letra grega Psi

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	SUPERFÍCIES DE CONTROLE DE AERONAVES	25
2.2	MARCADORES FIDUCIAIS	25
2.2.1	Conceito e Classificação	25
2.2.2	Marcadores ArUco	26
2.2.3	Estimação de Pose 6DoF	27
2.3	VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO ANGULAR	28
2.3.1	Calibração de Câmeras	28
2.3.2	Cálculo de Orientação Relativa	28
2.4	MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO	33
3.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	33
3.2.1	Hardware Utilizado	33
3.2.2	Posicionamento dos Marcadores	35
3.3	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	35
3.4	PROCEDIMENTOS DE TESTE	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	ANÁLISE QUANTITATIVA	37
4.2	ANÁLISE QUALITATIVA	38
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA COM MÉTODOS TRADICIONAIS	38
5	CONCLUSÃO	41
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5.2	TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	43

6	APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE	45
	ANEXOS	49
	ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO DIGITAL	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As superfícies de controle de aeronaves, compostas principalmente por ailerons, profundores (elevadores) e leme de direção, são elementos fundamentais para a manobrabilidade e estabilidade durante o voo. A medição precisa dos ângulos de deflexão dessas superfícies é uma atividade crítica em diversas etapas do ciclo de vida de uma aeronave, incluindo ensaios em solo, processos de certificação, calibração de sistemas de controle de voo e procedimentos de manutenção.

Os métodos convencionais para medição de deflexão de superfícies de controle incluem inclinômetros digitais, potenciômetros rotativos, sistemas ópticos complexos e instrumentação embarcada. Embora esses métodos sejam amplamente utilizados na indústria aeronáutica, apresentam limitações significativas relacionadas ao custo elevado dos equipamentos, complexidade de instalação e calibração, necessidade de contato físico com a superfície (o que pode interferir nas medições), tempo de setup prolongado e, em alguns casos, impossibilidade de fornecer feedback visual em tempo real.

Nesse contexto, o desenvolvimento de métodos alternativos baseados em visão computacional tem ganhado destaque na literatura científica. Xu *et al.* (2024) apresentaram um sistema de medição baseado em visão para ângulos de deflexão de superfícies de controle em ensaios de aeronaves, demonstrando a viabilidade da aplicação de técnicas de processamento de imagem em ambientes industriais. Paralelamente, como cita Garrido-Jurado *et al.* (2014), o uso de marcadores fiduciais, especialmente os marcadores ArUco, tem sido amplamente estudado em aplicações de estimação de pose, navegação de veículos autônomos e realidade aumentada.

Os marcadores ArUco são alvos codificados bidimensionais que permitem identificação única e estimação de pose 6DoF (seis graus de liberdade: três translações e três rotações) com alta precisão. Silva, Tommaselli e Artero (2014) demonstraram a eficácia do uso de alvos codificados do tipo ArUco na automatização do processo de calibração de câmeras, alcançando precisão subpixel na localização dos cantos dos marcadores. Ošćádal *et al.* (2020) propuseram uma estratégia de posicionamento tridimensional de marcadores ArUco para melhorar a precisão e estabilidade da estimação de pose, alcançando resultados significativamente superiores aos obtidos com marcadores individuais.

A aplicação de marcadores fiduciais para medição angular em aeronaves representa uma oportunidade de inovação tecnológica que combina baixo custo, facilidade de implementação e capacidade de operação em tempo real. Ao fixar um marcador na estrutura fixa da asa e outro na superfície de controle móvel, torna-se possível calcular a

orientação relativa entre eles através do processamento de imagens capturadas por uma câmera convencional. Este método não invasivo elimina a necessidade de contato físico com as superfícies e permite visualização instantânea das medições, características que são particularmente vantajosas em ambientes de manutenção e ensaios em solo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar um método em tempo real para medição de ângulos de deflexão de superfícies de controle de aeronaves utilizando marcadores fiduciais do tipo ArUco e técnicas de visão computacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar a tecnologia de marcadores fiduciais ArUco, incluindo seus princípios de funcionamento, métodos de detecção e técnicas de estimação de pose 6DoF;
- Implementar um sistema computacional capaz de detectar marcadores ArUco em tempo real e calcular a orientação relativa entre marcadores fixados em estruturas fixa e móvel;
- Realizar uma análise quantitativa da precisão do método proposto através de ensaios experimentais com medições de referência;
- Conduzir uma análise qualitativa abrangendo aspectos práticos como facilidade de implementação, custo-benefício e capacidade de feedback visual em tempo real;
- Identificar e caracterizar as limitações físicas do método em função de variáveis ambientais, tais como luminosidade, ângulo de visada da câmera, distância e oclusões;
- Comparar o método proposto com técnicas tradicionais de medição de deflexão descritas na literatura, destacando vantagens e desvantagens de cada abordagem.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos principais. O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualização, justificativa e objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os conceitos de superfícies de controle de aeronaves, marcadores fiduciais, visão computacional para medição angular e métodos tradicionais de medição. O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada, incluindo a configuração experimental, implementação computacional e procedimentos de teste. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, incluindo análises quantitativas, qualitativas,

estudo de limitações e comparação com métodos tradicionais. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SUPERFÍCIES DE CONTROLE DE AERONAVES

As superfícies de controle de aeronaves são componentes móveis projetados para modificar as características aerodinâmicas da aeronave e, conseqüentemente, controlar sua trajetória de voo. Essas superfícies atuam gerando momentos em torno dos três eixos principais da aeronave: eixo longitudinal (rolagem), eixo lateral (arfagem) e eixo vertical (guinada).

Os **ailerons** são superfícies de controle localizadas nas seções externas das asas, responsáveis pelo controle de rolagem da aeronave. Quando o piloto aciona o manche lateralmente, os ailerons se movem de forma diferencial: um aileron sobe enquanto o outro desce, criando uma diferença de sustentação entre as asas que resulta em um momento de rolagem.

Os **profundores** ou **elevadores** são superfícies de controle localizadas na empenagem horizontal (estabilizador horizontal), responsáveis pelo controle de arfagem. O movimento dos profundores altera o momento de arfagem da aeronave, permitindo ao piloto controlar o ângulo de ataque e, conseqüentemente, a altitude e velocidade da aeronave.

O **leme de direção** é uma superfície de controle localizada na empenagem vertical (estabilizador vertical), responsável pelo controle de guinada. O movimento do leme gera uma força lateral na cauda da aeronave, criando um momento em torno do eixo vertical que permite ao piloto controlar a direção do nariz da aeronave.

A medição precisa dos ângulos de deflexão dessas superfícies de controle é essencial por diversas razões. Em ensaios de solo, a verificação das amplitudes máximas de deflexão garante que o sistema de controle atende às especificações de projeto e aos requisitos de certificação. Já em procedimentos de manutenção, a medição dos ângulos permite identificar desgastes, folgas ou desalinhamentos nas articulações e sistemas de acionamento. (Xu *et al.*, 2024)

2.2 MARCADORES FIDUCIAIS

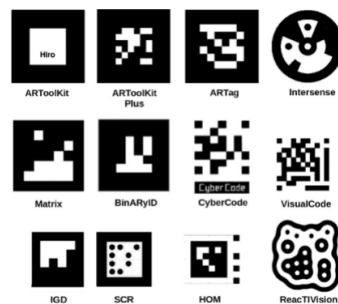
2.2.1 Conceito e Classificação

Marcadores fiduciais são padrões visuais artificiais projetados especificamente para serem facilmente detectados e identificados por sistemas de visão computacional. O termo “fiducial” deriva do latim *fiducia*, que significa confiança, refletindo a confiabilidade desses marcadores como pontos de referência em aplicações de visão artificial.

Os marcadores fiduciais desempenham papel fundamental em diversas aplicações,

incluindo realidade aumentada, navegação de robôs autônomos, calibração de câmeras, rastreamento de objetos e estimação de pose. A principal vantagem dos marcadores fiduciais em relação a características naturais da cena é a robustez da detecção, a identificação única de cada marcador e a capacidade de estimação precisa de posição e orientação tridimensionais. A Figura 1 mostra alguns tipos de marcadores fiduciais.

Figura 1 – Exemplo de tipo de marcadores fiduciais.



Fonte: Garrido-Jurado *et al.* (2014)

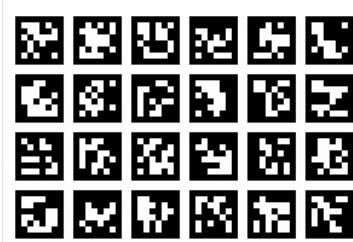
2.2.2 Marcadores ArUco

Os marcadores ArUco são marcadores fiduciais quadrados compostos por uma borda preta externa e uma matriz binária interna que codifica um identificador único. O nome ArUco deriva da biblioteca de software originalmente desenvolvida na Universidade de Córdoba, Espanha, que implementa algoritmos de detecção e rastreamento desses marcadores utilizando a biblioteca OpenCV. (OpenCV, 2025).

A estrutura de um marcador ArUco consiste em três elementos principais: a borda externa preta, que facilita a detecção inicial do marcador na imagem; a borda interna branca, que proporciona contraste com a região de codificação; e a matriz binária central, que codifica o identificador do marcador. Na Figura 1 é possível verificar alguns marcadores do tipo ArUco.

Silva, Tommaselli e Artero (2014) apresentaram uma proposta de utilização de alvos codificados do tipo ArUco na automatização do processo de calibração de câmeras. Os autores destacaram que o padrão ArUco foi escolhido devido à sua flexibilidade, capacidade para representar até 1.024 alvos diferentes e disponibilidade de código fonte implementado com a biblioteca OpenCV, garantindo simplicidade de implementação e alta confiabilidade.

Figura 2 – Exemplo de marcadores fiduciais ArUco.



Fonte: Santos (2022)

2.2.3 Estimação de Pose 6DoF

A estimação de pose 6DoF (seis graus de liberdade) refere-se ao processo de determinar a posição tridimensional (três coordenadas de translação: x, y, z) e a orientação tridimensional (três ângulos de rotação: roll, pitch, yaw) de um objeto em relação a um sistema de coordenadas de referência.

No contexto dos marcadores fiduciais, a estimação de pose é realizada através da solução do problema PnP (*Perspective-n-Points*), que consiste em determinar a posição e orientação de uma câmera (ou equivalentemente, de um objeto) dado um conjunto de correspondências entre pontos tridimensionais no objeto e suas projeções bidimensionais na imagem.

Este processo é fundamentado no modelo de câmera *pinhole*, onde Stankiewicz, Lafruit e Domański (2018) descreve a projeção de um ponto 3D do mundo em um ponto 2D no plano da imagem. A relação matemática é dada pela equação de projeção perspectiva de acordo com Trucco e Verri (1998):

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Onde:

- u, v são as coordenadas do ponto no plano da imagem (em pixels);
- s é um fator de escala;
- \mathbf{K} é a **matriz de parâmetros intrínsecos** da câmera;
- \mathbf{R} é a **matriz de rotação** 3×3 que descreve a orientação da câmera;
- \mathbf{t} é o **vetor de translação** 3×1 que descreve a posição da câmera;
- X_w, Y_w, Z_w são as coordenadas do ponto no sistema de referência mundial.

2.3 VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO ANGULAR

2.3.1 Calibração de Câmeras

A calibração de câmeras é um procedimento fundamental em aplicações de visão computacional que requerem medições métricas precisas. De acordo com Kuttila, Korpinen e Viitanen (2001), o processo de calibração consiste em determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, que descrevem matematicamente o modelo de formação de imagem, onde, estes são exemplificados na Figura 3.

Trucco e Verri (1998) define a **matriz de parâmetros intrínsecos** \mathbf{K} como:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Onde:

- f_x, f_y são as distâncias focais da câmera em pixels;
- c_x, c_y são as coordenadas do ponto principal (centro óptico) em pixels.

Além do modelo linear *pinhole*, a calibração deve modelar as **distorções da lente**. O modelo de distorção mais comum, utilizado por bibliotecas como o OpenCV, combina distorção radial e tangencial definidas em Trucco e Verri (1998).

Distorção Radial:

$$x_d = x_u(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (2.3)$$

$$y_d = y_u(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (2.4)$$

Distorção Tangencial:

$$x_d = x_u + [2p_1x_u y_u + p_2(r^2 + 2x_u^2)] \quad (2.5)$$

$$y_d = y_u + [p_1(r^2 + 2y_u^2) + 2p_2x_u y_u] \quad (2.6)$$

Onde $r^2 = x_u^2 + y_u^2$, e os coeficientes (k_1, k_2, k_3) e (p_1, p_2) representam, respectivamente, as distorções radial e tangencial.

2.3.2 Cálculo de Orientação Relativa

Uma vez obtidas as poses individuais de dois marcadores em relação à câmera, a orientação relativa entre eles pode ser determinada através de transformações de sistemas de coordenadas.

Sejam \mathbf{R}_A e \mathbf{t}_A a matriz de rotação e o vetor de translação do marcador A em relação à câmera, e \mathbf{R}_B e \mathbf{t}_B os parâmetros correspondentes para o marcador B. A matriz de rotação relativa \mathbf{R}_{AB} , que descreve a orientação do marcador B em relação ao marcador A, pode ser calculada como:

$$\mathbf{R}_{AB} = \mathbf{R}_B \mathbf{R}_A^T \quad (2.7)$$

Trucco e Verri (1998) define esta matriz de rotação relativa podendo então ser convertida em ângulos de Euler (*roll*, *pitch*, *yaw*), para uma matriz de rotação genérica:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Os ângulos de Euler (na convenção ZYX) podem ser extraídos da seguinte forma:

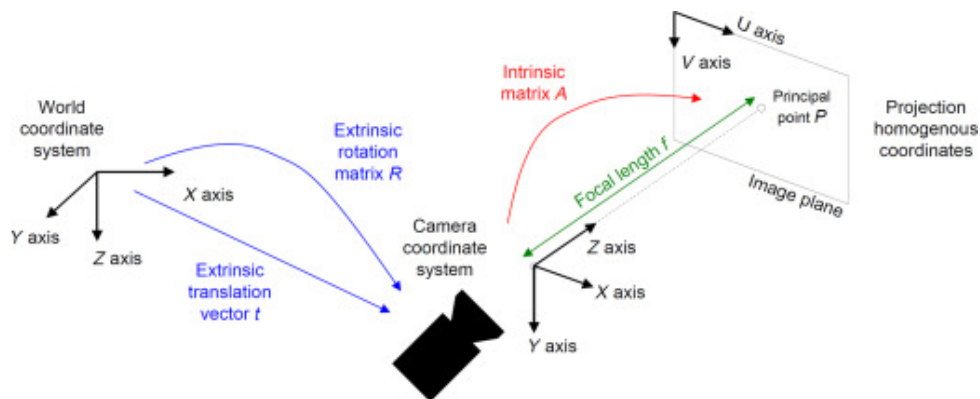
$$\theta = -\arcsin(R_{31}) \quad (2.9)$$

$$\psi = \arctan 2 \left(\frac{R_{21}}{\cos \theta}, \frac{R_{11}}{\cos \theta} \right) \quad (2.10)$$

$$\phi = \arctan 2 \left(\frac{R_{32}}{\cos \theta}, \frac{R_{33}}{\cos \theta} \right) \quad (2.11)$$

Onde θ é o ângulo de arfagem (*pitch*), ψ é o ângulo de guinada (*yaw*) e ϕ é o ângulo de rolagem (*roll*). No contexto deste trabalho, o ângulo de deflexão da superfície de controle corresponde tipicamente ao ângulo de arfagem θ .

Figura 3 – Exemplo de visualização dos parâmetros Intrínsecos e Extrínsecos.



Fonte: Stankiewicz, Lafruit e Domański (2018)

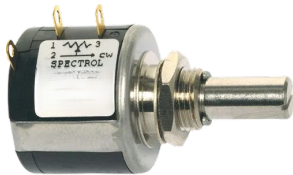
2.4 MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO

Os métodos tradicionais para medição de ângulos de deflexão de superfícies de controle de aeronaves incluem técnicas mecânicas, eletromecânicas e ópticas.

Potenciômetros Giratórios: São transdutores que variam a sua resistência elétrica baseado na variação de giro do eixo principal. Amplamente utilizado para medição de ângulo e movimento cinemático. É acoplado a superfície de comando, a qual necessita ter o seu ângulo medido, através de conjuntos mecânicos que, por sua vez, convertem o movimento angular em movimento de giro. Embora sejam instrumentos relativamente simples e de baixo custo, apresentam limitações relacionadas à necessidade de contato físico e a possibilidade de interferência com a movimentação natural da superfície, além da precisão limitada (tipicamente $\pm 0.2^\circ$ a $\pm 0.5^\circ$). As Figuras 4a e 4b representam sensores utilizados em uma aeronave de ensaio.

Figura 4 – Transdutor utilizado para a medição do ângulo de deflexão da superfície de comando em uma aeronave.

(a) Potenciômetro de precisão



Fonte: Próprio Autor, 2025

(b) Mecanismo projetado para representar a cinemática de movimento da superfície de comando



Fonte: Próprio Autor, 2025

Inclinômetros digitais são dispositivos eletrônicos que utilizam sensores MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) para medir inclinação em relação à gravidade. Estes instrumentos podem ser temporariamente fixados às superfícies de controle durante ensaios e fornecem leituras digitais com precisão típica de $\pm 0.1^\circ$ a $\pm 0.2^\circ$. A Figura 5 mostra um inclinômetro digital utilizado para realizar as medidas de ângulo.

Figura 5 – Exemplo de inclinômetro digital utilizado para a medição do ângulo de deflexão da superfície de comando.



Fonte: Mitutoyo (2025)

Sistemas ópticos baseados em laser utilizam feixes de laser e sensores de

posição para medir deslocamentos angulares sem contato físico. Estes sistemas podem oferecer alta precisão ($\pm 0.01^\circ$ a $\pm 0.05^\circ$), porém apresentam custo elevado, complexidade de instalação e calibração, além da sensibilidade a condições ambientais. A Figura 6 representa um sistema de medição a laser utilizado para medir não somente ângulo, mas amplamente empregado para controle dimensional em aeronaves.

Figura 6 – Exemplo de sistema de medição de ângulo a laser.



Fonte: Vantage^{S6} (2025)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto neste trabalho consiste em um método não invasivo para medição em tempo real do ângulo de deflexão de superfícies de controle de aeronaves utilizando marcadores fiduciais do tipo ArUco e técnicas de visão computacional. O princípio de funcionamento baseia-se na detecção simultânea de dois marcadores: um fixado na estrutura rígida da asa (marcador de referência) e outro fixado na superfície de controle móvel (marcador móvel).

O fluxo de operação do sistema pode ser descrito em cinco etapas principais:

1. **Captura de imagem:** Uma câmera digital captura imagens contínuas da região de interesse, que inclui tanto a estrutura fixa quanto a superfície de controle móvel.
2. **Detecção de marcadores:** Cada imagem capturada é processada pelo algoritmo de detecção de marcadores ArUco implementado na biblioteca OpenCV.
3. **Estimação de pose:** Para cada marcador detectado, o algoritmo resolve o problema PnP para determinar sua posição e orientação tridimensionais em relação ao sistema de coordenadas da câmera.
4. **Cálculo de orientação relativa:** Uma vez obtidas as poses individuais dos marcadores de referência e móvel, a orientação relativa entre eles é calculada através de transformações de sistemas de coordenadas.
5. **Visualização e registro:** O ângulo de deflexão calculado é exibido em tempo real sobreposto à imagem capturada.

3.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

3.2.1 Hardware Utilizado

A configuração experimental desenvolvida neste trabalho utiliza componentes de hardware acessíveis e amplamente disponíveis:

- **Câmera:** Câmera digital USB (Universal Serial Bus) com sensor CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), resolução de 1920×1080 pixels e taxa de aquisição de 30 quadros por segundo, mostrada na Figura 7

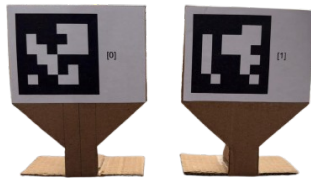
Figura 7 – Câmera utilizada para aquisição das imagens.



Fonte: Próprio Autor (2025)

- **Marcadores ArUco:** Marcadores (Figura 8) do dicionário DICT_6X6_250, com tamanhos de 50 mm × 50 mm, impressos em papel fotográfico de alta qualidade.

Figura 8 – Marcadores com seus respectivos IDs utilizados para as medições.



Fonte: Próprio Autor (2025)

- **Estrutura de teste:** Todos os teste foram realizados utilizando uma aeronave Aermacchi MB326, mostrada na Figura 9, onde os dados adquiridos foram do Aileron Direito.

Figura 9 – Aeronave Aermacchi MB326, também conhecida como AT-26 Xavante.



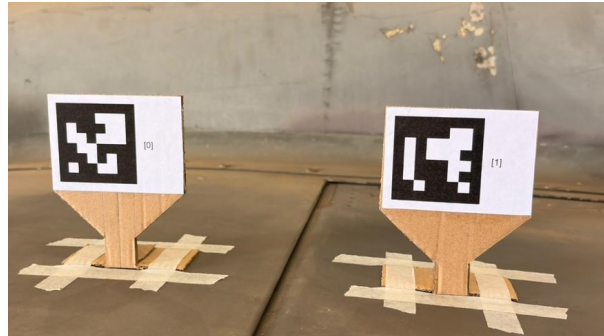
Fonte: Próprio Autor (2025)

- **Computador:** Processador Intel Core i7, 16 GB de RAM (Random Access Memory), sistema operacional Microsoft Windows 11.

3.2.2 Posicionamento dos Marcadores

Dois marcadores foram utilizados no experimento, como vistos na Figura 10:

Figura 10 – Marcadores fixados sobre o Aileron.

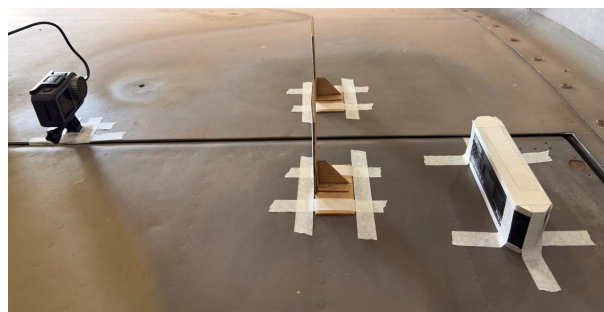


Fonte: Próprio Autor (2025)

- **Marcador de referência (ID 0):** Fixado na placa fixa (estrutura da asa) a aproximadamente 100 mm do eixo de articulação.
- **Marcador móvel (ID 1):** Fixado na placa articulada (superfície de controle) a aproximadamente 100 mm do eixo de articulação.

A câmera foi posicionada, como mostrado na Figura 11, a uma distância de aproximadamente 300 mm dos marcadores, com o eixo óptico perpendicular ao plano médio entre os dois marcadores quando a superfície está em posição neutra.

Figura 11 – Posicionamento dos Marcadores, Câmera e Inclinômetro de Referência.



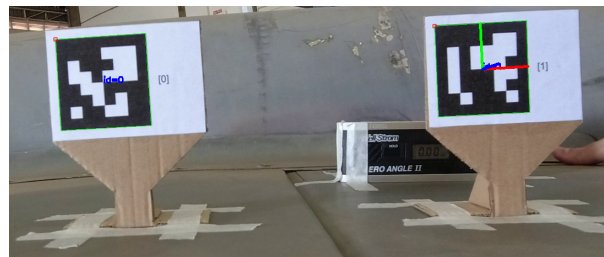
Fonte: Próprio Autor (2025)

3.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação computacional do sistema foi desenvolvida em linguagem Python utilizando a biblioteca OpenCV para operações de visão computacional. O módulo principal do sistema implementa as seguintes funcionalidades:

- Inicialização do detector ArUco;
- Captura de vídeo através do módulo VideoCapture do OpenCV;
- Loop principal de processamento;
- Funções auxiliares para conversão de rotação;
- Visualização em tempo real com informações sobrepostas, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de identificação dos Marcadores pelo Algoritmo.



Fonte: Próprio Autor (2025)

A calibração da câmera foi realizada previamente utilizando o método de Zhang implementado no OpenCV, com um painel de tabuleiro de xadrez 9×6 . O erro de reprojeção médio obtido foi de 0.57 pixels, indicando calibração de boa qualidade.

3.4 PROCEDIMENTOS DE TESTE

Os procedimentos de teste foram projetados para avaliar a precisão do método proposto e caracterizar suas limitações:

- **Teste de precisão quantitativa:** A superfície de controle foi deflexionada em intervalos de 2° , cobrindo o intervalo de -12° a $+10^\circ$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

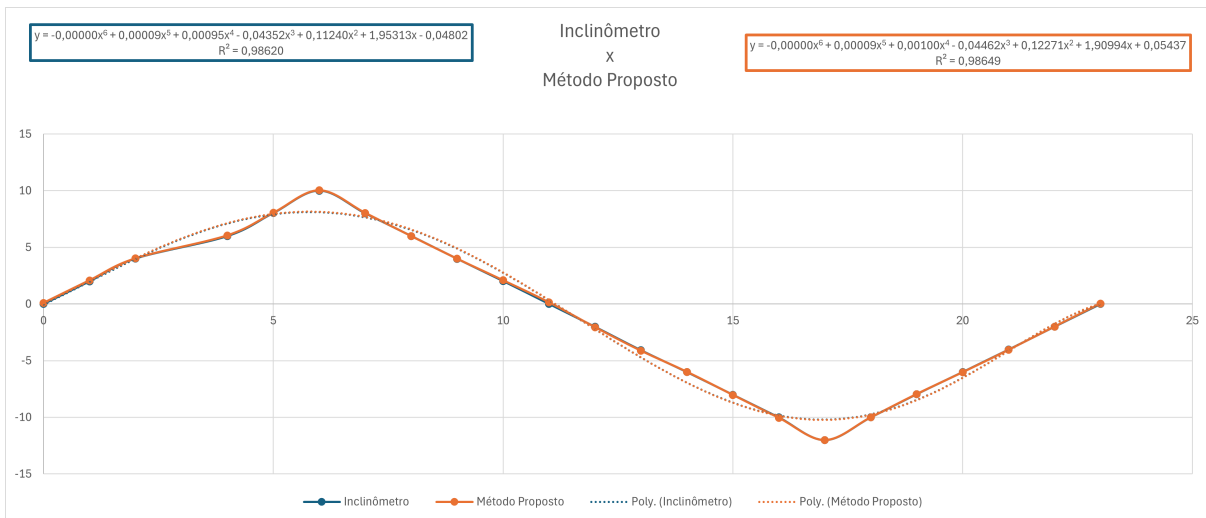
Os testes de precisão quantitativa demonstraram que o método proposto é capaz de fornecer medições de ângulo de deflexão com precisão elevada em condições controladas. A Tabela 1 apresenta os resultados das medições para o intervalo de deflexão testado.

Tabela 1 – Resultados de medições de ângulo de deflexão

Inclinômetro Referência (°)	Sistema Proposto (°)	Erro Absoluto (°)	Desvio Padrão (°)
0.00	0.097	0.069	0.093
2.00	2.090	0.020	0.030
4.01	4.030	0.033	0.046
5.99	6.057	0.044	0.065
8.02	8.053	0.029	0.040
10.00	10.033	0.051	0.068
8.00	8.040	0.047	0.062
6.00	5.990	0.027	0.040
3.99	3.993	0.049	0.064
2.03	2.093	0.038	0.049
0.01	0.143	0.018	0.025
-2.01	-2.047	0.058	0.081
-4.08	-4.130	0.027	0.036
-6.00	-5.987	0.049	0.064
-8.00	-8.027	0.056	0.072
-10.00	-10.050	0.067	0.087
-12.00	-12.013	0.051	0.083
-10.00	-10.007	0.067	0.032
-7.95	-7.947	0.038	0.051
-6.00	-6.027	0.038	0.055
-4.02	-4.047	0.024	0.035
-2.00	-1.990	0.013	0.020
0.00	0.043	0.024	0.032

Os resultados indicam que o erro absoluto médio das medições foi de 0.039° , com valor máximo de 0.069° . O desvio padrão médio foi de 0.054° , demonstrando boa repetibilidade das medições como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Comparação entre a referência e o método proposto.



Fonte: Próprio Autor (2025)

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa do método proposto considerou aspectos práticos relevantes para aplicações reais:

- **Facilidade de implementação:** Configuração completa em aproximadamente 10 minutos.
- **Custo-benefício:** Custo total inferior a R\$ 1.000,00.
- **Capacidade de feedback visual:** Sobreposição de informações gráficas em tempo real.
- **Não invasividade:** Marcadores fixados com fita adesiva removível.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA COM MÉTODOS TRADICIONAIS

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre o método proposto e métodos tradicionais.

Tabela 2 – Comparação entre métodos de medição de deflexão

Critério	Inclinômetro Digital	Sistema Óptico	Método Proposto
Precisão típica	$\pm 0.1^\circ$	$\pm 0.001^\circ$	$\pm 0.033^\circ$
Custo	Médio (R\$ 1.500)	Muito alto (R\$ 200.000)	Muito baixo (R\$ 1.000)
Tempo de setup	5-10 min	30-60 min	10-15 min
Contato físico	Sim	Não	Não
Tempo real	Sim	Sim	Sim
Feedback visual	Limitado	Sim	Sim
Portabilidade	Alta	Baixa	Alta

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e validação de um método em tempo real para medição de ângulos de deflexão de superfícies de controle de aeronaves utilizando marcadores fiduciais do tipo ArUco e técnicas de visão computacional. Os objetivos estabelecidos foram alcançados através de uma abordagem metodológica que combinou fundamentação teórica sólida, implementação computacional eficiente e validação experimental sistemática.

Os resultados experimentais demonstraram que o método proposto é capaz de fornecer medições de ângulo de deflexão com precisão de $\pm 0.086^\circ$, erro absoluto médio inferior a 0.045° e desvio padrão médio de 0.033° em condições controladas. Estes valores são comparáveis ou superiores aos obtidos com inclinômetros digitais, validando a viabilidade técnica do método.

Conclui-se que o método proposto é viável para aplicações práticas em ensaios de solo e manutenção de aeronaves, representando uma alternativa tecnicamente eficaz e economicamente acessível aos sistemas convencionais.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, diversas direções promissoras para trabalhos futuros podem ser sugeridas:

- **Miniaturização do sistema:** Investigar a implementação em plataformas embarcadas de baixo custo (Raspberry Pi, NVIDIA Jetson Nano);
- **Filtragem e suavização:** Implementar filtros Digitais para reduzir ruído;
- **Configuração tridimensional:** Utilizar múltiplos marcadores para melhorar precisão;
- **Múltiplas superfícies simultâneas:** Estender para medição de várias superfícies ao mesmo tempo;
- **Integração com sistemas de controle:** Desenvolver interfaces de comunicação (ARINC 429, CAN bus);
- **Validação em aeronaves reais:** Realizar testes de campo em condições operacionais;

- **Melhorias de robustez:** Investigar técnicas avançadas para condições adversas;
- **Análise de incerteza metrológica:** Caracterização metrológica completa para certificação.
- **Luminosidade:** Testes sob diferentes condições de iluminação
- **Obstáculos e Ocluições:** Testes sob condições oclusão e/ou obstáculos à frente dos Marcadores.
- **Ângulos de visada:** Teste em diferentes ângulos de visada entre câmera e Marcadores.

REFERÊNCIAS

- GARRIDO-JURADO, S. *et al.* Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. **Pattern Recognition**, v. 47, n. 6, p. 2280–2292, jun. 2014. ISSN 00313203. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320314000235>.
- KUTILA, M.; KORPINEN, J.; VIITANEN, J. Camera calibration in machine automation. *In: Human Friendly Mechatronics*. Elsevier, 2001. p. 211–216. ISBN 9780444506498. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978044450649850036X>.
- MITUTOYO Digital Protactor. 2025. Disponível em: <https://www.globaltestsupply.com/pdfs/cache/www.globaltestsupply.com/950-317/datasheet/950-317-datasheet.pdf>.
- OPENCV ArUco. 2025. Disponível em: https://docs.opencv.org/3.4/d9/d6a/group__aruco.html.
- OščáDAL, P. *et al.* Improved Pose Estimation of Aruco Tags Using a Novel 3D Placement Strategy. **Sensors**, v. 20, n. 17, p. 4825, ago. 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4825>.
- SANTOS, H. I. d. A. Sistema de localização de robôs móveis usando marcadores ArUco. maio 2022. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/33577>.
- SILVA, S. L. A. D.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. UTILIZAÇÃO DE ALVOS CODIFICADOS DO TIPO ARUCO NA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 3, p. 626–646, set. 2014. ISSN 1982-2170, 1413-4853. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702014000300626&lng=pt&tlng=pt.
- STANKIEWICZ, O.; LAFRUIT, G.; DOMAŃSKI, M. Chapter 1 - Multiview video: Acquisition, processing, compression, and virtual view rendering. *In: CHELLAPPA, R.; THEODORIDIS, S. (ed.). Academic Press Library in Signal Processing, Volume 6*. Academic Press, 2018. p. 3–74. ISBN 978-0-12-811889-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128118894000014>.
- TRUCCO, E.; VERRI, A. **Introductory techniques for 3-D computer vision**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998. ISBN 9780132611084.
- VANTAGE^{S6} Max and Vantage^{E6} Max Laser Trackers. 2025. Disponível em: <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-faro-vantage-s6-e6-laser-trackers>.
- XU, J. *et al.* Vision Based Deflection Angle Measurement of Flight Control Surfaces in Aircraft Testing. *In: 2024 IEEE 22nd International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Beijing, China: IEEE, 2024. p. 1–6. ISBN 9798331527471. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10774439/>.

6 APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE

Listing 6.1 – Código fonte para Medição do Ângulo de Deflexão de Superfícies

```

1
2
3 import cv2
4 import cv2.aruco as aruco
5 import numpy as np
6 import csv
7 import time
8 import math
9 import os # Importado para gerenciar diretórios
10 from scipy.spatial.transform import Rotation as R
11
12 # Parâmetros da câmera (calibração)
13 camera_matrix = np.array([[848.59018663, 0.0, 960.7657788],
14 [0.0, 856.42981445, 538.07840466],
15 [0.0, 0.0, 1.0]], dtype=np.float32)
16
17 dist_coeffs = np.array([[-0.08464709, 0.07412924, -0.00279243,
18 -0.00190268, -0.02997581]], dtype=np.float32)
19
20 # IDs dos marcadores
21 referencial_id = 0 # marcador fixo
22 marcadores_moveis = [1,2] # IDs dos móveis
23
24 # Dicionário ArUco
25 aruco_dict =
26     cv2.aruco.getPredefinedDictionary(aruco.DICT_6X6_250)
27 parameters = cv2.aruco.DetectorParameters()
28
29 # Tamanho do marcador em metros
30 marker_length = 0.05
31
32 is_paused = False
33
34 # Inicializa o vídeo
35 cap = cv2.VideoCapture('DJI_0824.MP4')

```

```
36 # Arquivo CSV para salvar os dados
37 csv_file = open('Resultados_do_Processamento.csv', 'w',
38               newline='')
39 csv_writer = csv.writer(csv_file)
40 csv_writer.writerow([
41 'timestamp', 'frame',
42 'marker_id', 'pos_x_m', 'pos_y_m', 'pos_z_m',
43 'roll_deg', 'pitch_deg', 'yaw_deg',
44 'distance_m'
45 ])
46 frame_count = 0
47
48 while True:
49     # --- Gerenciamento de Pausa ---
50     if not is_paused:
51         ret, frame = cap.read()
52         if not ret: break
53         frame_count += 1
54         gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
55         corners, ids, _ = cv2.aruco.detectMarkers(gray, aruco_dict,
56                                               parameters=parameters)
57
58         if ids is not None:
59             rvecs, tvecs, _ = cv2.aruco.estimatePoseSingleMarkers(
60                 corners, marker_length, camera_matrix, dist_coeffs)
61
62             poses = {id_: {'rvec': r, 'tvec': t}
63                     for id_, r, t in zip(ids.flatten(), rvecs, tvecs)}
64
65             if referencial_id in poses:
66                 referencial_pose = poses[referencial_id]
67
68             for marker_id in marcadores_moveis:
69                 if marker_id in poses:
70                     mobile_pose = poses[marker_id]
71
72             R_ref, _ = cv2.Rodrigues(referencial_pose['rvec'])
73             R_mov, _ = cv2.Rodrigues(mobile_pose['rvec'])
74
75             t_ref = referencial_pose['tvec'].reshape(3, 1)
76             t_mov = mobile_pose['tvec'].reshape(3, 1)
```

```

76
77 R_rel = R_mov @ R_ref.T
78 t_rel = t_mov - R_rel @ t_ref
79
80 rotation = R.from_matrix(R_rel)
81 roll_deg, pitch_deg, yaw_deg = rotation.as_euler('xyz',
82         degrees=True)
83
84
85 distance = np.linalg.norm(t_rel)
86
87 # Salva no CSV
88 now = time.time()
89 csv_writer.writerow([
90     now, frame_count,
91     marker_id,
92     t_rel[0][0], t_rel[1][0], t_rel[2][0],
93     roll_deg, pitch_deg, yaw_deg,
94     distance
95 ])
96
97 # Exibe no v deo
98 cv2.aruco.drawDetectedMarkers(frame, corners, ids)
99 cv2.drawFrameAxes(frame, camera_matrix, dist_coeffs,
100     mobile_pose['rvec'], mobile_pose['tvec'], marker_length / 2)
101
102 display_text = f'frame_{frame_count}_id_{marker_id}:_
103     YAW={yaw_deg:.2f}_PITCH={pitch_deg:.2f}_ROLL={roll_deg:.2f}_
104     Dist={distance:.2f}m'
105
106 cv2.putText(frame, display_text,
107     (10, 30 + 30 * marker_id), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
108     0.6, (255, 0, 0), 2)
109
110 cv2.imshow('Processamento de Imagens', frame)
111
112 # --- Controle de Teclas ---
113 # waitKey(1) para verificar teclas rapidamente, mesmo pausado
114 key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
115
116 if key == ord('p') or key == ord('P'):
117     is_paused = True
118 elif key == ord('c') or key == ord('C'):
119     is_paused = False

```

```
114 elif key == ord('q'):  
115     break  
116  
117 csv_file.close()  
118 cap.release()  
119 cv2.destroyAllWindows()
```

ANEXOS

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO INCLINÔMETRO DIGITAL

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Certificado: CAL-00065550

Data da calibração: 27/08/2025

Dados do instrumento

Identificador:

F496593

Nome:

CLINÔMETRO DIGITAL PRO 3600 AERO ANGLE

Procedimento utilizado:

Condições ambientais

Temperatura:

20.0 ± 2.0 °C

Umidade relativa:

64.8

Padrões

Identificador	Nome	Certificado	Laboratório	Data da calibração	Vencimento
F496872	MESA DE DESEMPENO 1000 X 1000 MM MITUTOYO NS1801010BR	CAL 157 AFERITEC N° 61692-204		09/08/2024	09/08/2029
X041659	BLOCO PADRAO ANGULAR 10° NS F132485	RBC N° 6341-205 CAL 0157 AFERITEC		28/01/2025	28/01/2026
X041660	BLOCO PADRAO ANGULAR 25° NS F132486	RBC N° 6342-205 CAL 0157 AFERITEC		28/01/2025	28/01/2026
X041661	BLOCO PADRAO ANGULAR 45° NS F132487	RBC N° 6343-205 CAL 0157 AFERITEC		28/01/2025	28/01/2026

Total de registros: 4

Observações:

Este certificado de calibração é relativo apenas ao instrumento de medição descrito no item "Dados do instrumento", não se estendendo a lotes ou outros instrumentos fabricados em série.

Os padrões utilizados pelo laboratório de calibração são calibrados em períodos determinados e estas calibrações são rastreáveis ao INMETRO/RBC ou outros organismos internacionais.

Os Laboratórios de Calibração estão inseridos no Sistema de Gestão da Qualidade o qual está em conformidade e segue os requisitos estabelecidos na AS9100/ISO9001.

Observations:

This calibration certificate relates only to the measuring instrument described in the item "Instrument data" and does not extend to lots or other instruments manufactured in series.

Standards used by the Calibration Laboratory are calibrated at specified periods and these calibrations are traceable to INMETRO / RBC or other international organizations.

Calibrations Laboratories are inserted in Quality Management System which is on conformance with AS9100/ISO9001 requirements.

Tabelas

Nome: ÂNGULO	Atributo: Objetivo	Resolução: 0,010	Unidade: ° Graus	Probabilidade: 95,45%	Resultado: Aprovado
Leitura: Ciclos no S.M. a calibrar	Incerteza total: 0,094	Faixa de medição: 0,000 90,000		Faixa de trabalho: 0,000 90,000	

Calibração

V.V.C	Limite erro adm.	Média	Td	Inc. exp.	K	Resultado
0,000	-0,055 / 0,055	0,000	0,000	0,02277	2,00	Aprovado
10,000	-0,200 / 0,200	10,050	0,050	0,09352	2,21	Aprovado
25,000	-0,200 / 0,200	25,000	0,000	0,06186	2,00	Aprovado
45,000	-0,400 / 0,400	45,050	0,050	0,09352	2,21	Aprovado
90,000	-0,400 / 0,400	89,950	-0,050	0,09352	2,21	Aprovado

Total de registros: 5

Resultado

Resultado:

Aprovado

Legenda

V.V.C: Valor verdadeiro convencional

Td.: Tendência

K: Fator de abrangência

Inc. exp.: Incerteza expandida