

# Sistema de inspeção e controle para experimentos em robótica espacial

Glaydson Luiz B Lima [1], Osamu Saotome [1]

Ijar M. da Fonseca [2]

<sup>1</sup> ITA, Depto. de Eng. Eletrônica e Computação,  
DCTA, São José dos Campos, SP, Brazil  
glaydson.berozzi@gmail.com

<sup>2</sup> INPE e ITA, Depto. de Eng. Mecatrônica, DCTA,  
São José dos Campos, SP, Brazil

**Abstract**— The system of communication between the various elements in a robotic system is responsible for coordinating the commands sent from the control system to the robotic arm, reading signals from the sensors and communicating the robotic system with the ground station. The robotic system under development by the ITA space robotics research group was developed with the purpose of simulating a robotic space system with the objective of studying fundamental components of operation and integration of all the components involved. This experiment consists of two identical units of robotic manipulators floating on an aerosol supported platform with the objective of performing the coupling maneuver. The closed circuit for this system involves the position capture by means of a position-tracking (X, Y and Z) computer system supported by the Kinect sensor (RGB-D), capable of processing the positional images with greater precision and accuracy by means of a computer that sends the result to a second computer that performs the coupling processing by algorithms in Matlab and Simulink and sends commands to the robotic arm via WIFI (UDP protocol) network [3, 6]. The robot executes the commands that perform the movement of the robotic arms that are again captured by the motion capture device allowing the adequate matching of aero platforms supported in a microgravity environment.

**Keywords**— Computer Vision, Robotics, Space, Microgravity, RGB-D, System of Communication, Aero Platforms, Network Sensors.

## I. INTRODUÇÃO

A exploração espacial tem feito intenso uso da robótica desde o início da conquista do espaço. Todas os satélites eram de fato naves robóticas programadas para enviar dados à terra. Nos primórdios da era espacial as naves eram programadas para enviar informações sobre a alta atmosfera, campo magnético da terra e topografia da Lua, Venus e Marte. As primeiras naves de impacto enviaram imagens e vídeos da Lua. Mas enviaram informações sobre a atmosfera e temperatura de Marte. Robôs foram construídos e operados na superfície coberta de poeira da Lua e na superfície rochosa de Marte. Rovers de Marte enviam composição química do solo, analisam a existência de água no subsolo, buscam informação sobre possibilidade de vida no planeta vizinho. Todas essas operações não seriam possíveis sem os robôs com habilidade de operar de forma automática e autônoma [1, 2]. A conquista da Lua e Marte passa por operações orbitais de rendezvous and

docking/berthing (RVD/B). As missões que levam esse nome foram inicialmente executadas manualmente por astronautas na missão que levou o homem a Lua em 1969. Hoje as missões de RVD/B que prestam serviços em órbita não são tripuladas. Softwares embarcados a bordo realizam a aproximação bem como o acoplamento em órbita de forma automatizada e contam com o suporte de estações de terra. São operações de alto risco, pois no ambiente espacial os corpos experimentam uma aparente ausência de peso (ambiente de microgravidade). A base das naves robóticas que contêm manipuladores são como *free flying robots* e são sensíveis ao movimento de braços mecânicos. Manter a velocidade, posição e atitude relativas entre as naves requer completa estabilização da plataforma robótica (espaçonave) durante o RVD/B [5, 7]. Nesse contexto os experimentos e laboratório em terra são fundamentais para a simulação e validação dos algoritmos de controle via testes. Como o ambiente de microgravidade só pode ser obtido em laboratório por um tempo muito curto (entre 4 a 8 segundos, em torres de microgravidade), uma das soluções encontradas foram os experimentos com robôs chamados flutuantes. A plataforma robótica de fato não flutua, mas opera quase sem atrito sobre um fino colchão de ar (4 microns). Nessa configuração a plataforma, às vezes referida como uma base não inercial, por ser móvel, reage aos movimentos do braço mecânica causando problemas das operações, principalmente quando um alvo precisa ser agarrado e movido de um outro lugar como naquelas operações de capturar satélites para realizar serviços de manutenção em órbita. No ITA um experimento vem sendo desenvolvido nesse sentido, visando teste de algoritmos usados para simulações computacionais do controle de operações orbitais de RVD/B[4]. O experimento envolve dois manipuladores robóticos aero suportados que operam sem fio, com hardware e software embarcado na plataforma móvel. Nesse experimento o sistema de comunicação desempenha um papel de suma importância para os testes de controle do movimento translacional rotacional relativo dos robôs aero suportados durante operações de aproximação e acoplamento sobre uma mesa de vidro.

### A. Manipulador robô

O sistema computacional de rastreamento de posição proposto neste artigo utilizada visão computacional associada à *Deep Learning*. O robô (Figura 1) foi concebido tendo como base um

braço robótico de 6 graus de liberdade. Este braço robótico é fixado em uma base deslizante sobre uma mesa de vidro balanceada. A base possui sapatas que permitem que esta seja suspensa em uma camada de ar-comprimido. Dessa forma a base simula o movimento translacional-rotacional planar (x,y) em um ambiente no qual o atrito é extremamente baixo.

O movimento é analisado sob a premissa de que toda a dinâmica ocorre em sobre uma plataforma móvel não fixa (aero suportada). Portanto com este experimento é possível verificar o impacto do movimento do braço mecânico sobre a plataforma aero suportada, no plano x-y. Além disso, é possível testar estratégias de acoplamento na forma de algoritmos que resultem no acoplamento de dois robôs com estas mesmas configurações. Esse cenário ocorre no espaço, onde duas espaçonaves sob ausência aparente de peso, se aproxima e se acoplam (operações orbitais de *Rendezvous and docking/berthing*).



Figura 1: Robô deslizante com braço robótico de 6 graus de liberdade

Com a finalidade de executar manobras de deslocamento e rotação do robô para cumprir o objetivo de sua missão, o robô possui dois atuadores a ar comprimido, tendo cada um três saídas de jatos de ar-comprimido que serão usados no controle da movimentação de cada robô (Figura 2), em translação e rotação.



Figura 2: Bicos de jatos de ar para movimentação do robô e sapatas de sustentação

Para isso o robô possui dois cilindros de ar comprimido (Figura 3), um com a responsabilidade de manter o robô suspenso por suas sapatas e outro com a função de fornecer ar para os atuadores.

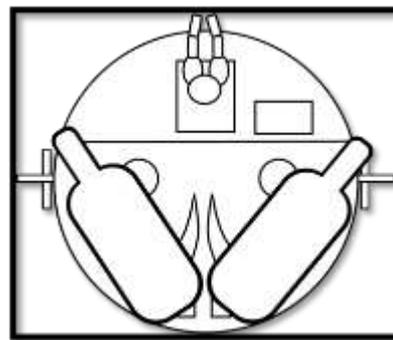


Figura 3: Localização dos cilindros de ar-comprimido no robô

O robô recebe comandos de tempo e direção para o disparo de jato dos atuadores (figura 3)

O robô não possui nenhum tipo de sensor em sua estrutura.

### B. Sistema de inspeção e controle

Os movimentos de posição e direção são obtidos por um sistema de captura e processamento de imagens utilizando o sensor *Kinect One*, fabricado pela Microsoft. Na figura 4 é apresentado o posicionamento do *Kinect* em relação ao plano de onde o robô aero suportado vai operar.

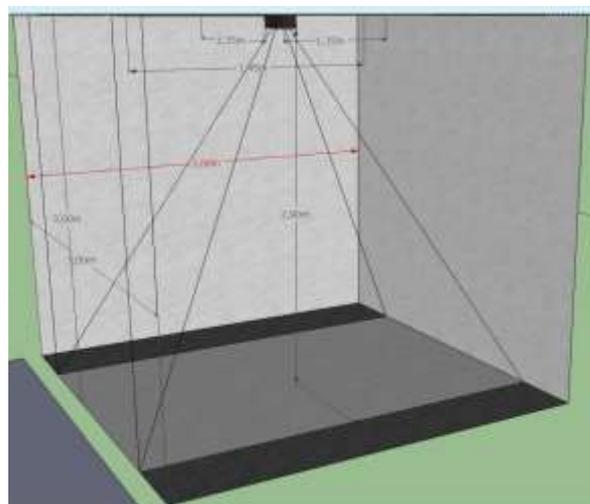


Figura 4: Posicionamento Kinect (sensor RGB-D)

Este sensor é composto por um conjunto de câmeras que captura a imagem (RGB) e profundidade (*Depth*) HD. A integração das informações de profundidade e cores de dados resulta em uma nuvem de pontos coloridos que contém cerca de 300.000 pontos em cada frame. Ao registrar as imagens RGB e de profundidade, consecutivamente, pode-se obter uma maior densidade dos pontos, com precisão aceitável [8, 9], permitindo assim criar uma nuvem de pontos completa de um ambiente interno, possivelmente, em tempo real.[10]

Com essa captura, os dados são enviados para um computador que analisa as imagens e produz um registro de posição, direção e velocidade de cada um dos robôs no experimento. Sua localização será auxiliada por etiquetas redondas e

coloridas que auxiliarão o processo de reconhecimento do robô e seu posicionamento. Estas informações são enviadas a um segundo computador que faz o controle do experimento. Ele possui a lógica que está sendo testada e de posse das informações capturadas, ajusta os comandos a serem enviados para os robôs. Cada robô recebe comandos por meio de uma conexão WIFI via protocolo UDP. Estes comandos implementados e resultados associados são coletados pelo módulo de captura (Figura 5).

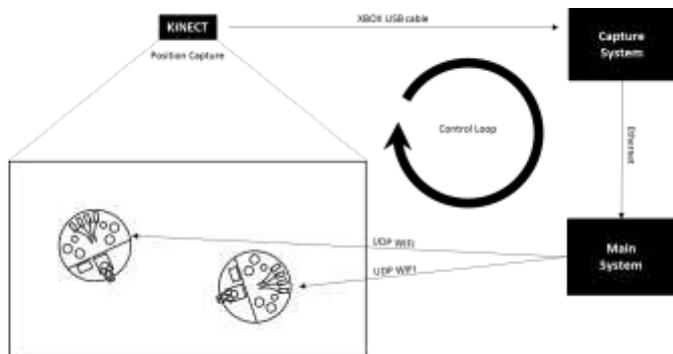


Figura 5: Loop de controle dos robôs

O sistema de captura deve possuir algumas funcionalidades para que possa operar adequadamente de maneira a prover informações suficientemente precisas visando o controle dos movimentos dos robôs de forma efetiva. As funcionalidades básicas do sistema de captura estão relacionadas abaixo.

1. Identificar marcações coloridas posicionadas na mesa, nos robôs e nos braços articulados (Figura 6). A identificação das marcas é realizada por meio de técnicas de visão computacional e processamento de imagens. É aplicado o algoritmo de *Hough* para detectar formas circulares, aplica-se o algoritmo de Sobel e na sequência aplica-se algoritmo de detecção de cores RGB. Ao detectar as regiões de interesse são calculados os centroides de cada círculo colorido de interesse (vermelho, azul e amarelo), desenhado um ponto no centroide e iniciado o *tracking* das coordenadas X, Y e Z em relação a esses pontos. O que permite ter o posicionamento adequado de toda área, posição do robô e deslocamento dos manipuladores robóticos.

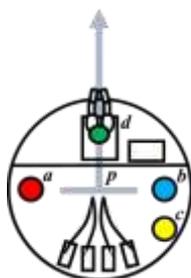


Figura 6: Marcações coloridas para identificação da posição, direção e posicionamento do braço do robô

2. Calcular a posição e direção da base dos robôs em relação à mesa. A posição do robô  $p$  é o ponto médio entre  $a$  e  $b$ .
3. Determinar a direção do robô, definida pelo vetor  $u = (c, b)$
4. Identificar a posição  $d$  do braço robótico de cada robô. A mão do robô possui uma marca colorida cuja posição é comparada com a posição do robô e sua respectiva direção para identificar sua posição relativa à base do robô.
5. Enviar via protocolo UDP os pacotes dos sinais de sensores que capturam sinais de luminosidade (*lumens*), intensidade de luz (*luxs*) e raios ultravioleta (UV) do ambiente. A variação desses sinais altera a acurácia das coordenadas. Por isso esses sinais são capturados e enviados para o sistema de controle.
6. Enviar via protocolo UDP os pacotes de dados de posicionamento para o sistema de controle (conexão ethernet).

Estas informações são utilizadas para compor o pacote de dados (7) a ser enviado para o sistema de controle.

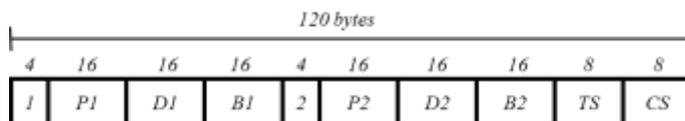


Figura 7: Composição do pacote de dados gerado pelo sistema de captura

Parte	Descrição
1	Dados dos sensores
2	Posição do robô 1 (double, double)
3	Posição e Direção do robô 1 (double, double)
4	Posição do braço do robô 1 (double, double)
5	Indicação de leitura para o robô 2 (int)
6	Posição do robô 2 (double, double)
7	Direção do robô 2 (double, double)
8	Posição do braço do robô 2 (double, double)
9	Time stamp
10	Checksum

Quando o sistema de controle recebe os dados da rede de sensores são aplicadas técnicas de *Deep de Learning* com os sinais para que o sistema possa manter o dado histórico e aprender os níveis de correções adequados para manter o melhor processamento de imagem permitindo um rastreamento com

melhor precisão e ajuste automático as condições do ambiente de testes.

Dessa forma o sistema computacional recebe todos os dados do ambiente, aplica filtros e calibração e ao receber o posicionamento real do robô mantendo maior coerência entre o ambiente real e o processado pelo sistema de navegação do robô. Permitindo então acoplar os dois robôs uma vez que podem ser determinadas a velocidade, posição e distância relativas dos dois manipuladores robóticos já considerando as variações de comportamento físicos locais (luz, raios UV, etc). De posse dessas informações o sistema de controle implementa algoritmos de forma a executar o acoplamento dos dois robôs corretamente.

Os comandos básicos do sistema de controle estão relacionados abaixo.

1. Calcular a velocidade e direção do movimento de um robô.
2. Calcular a distância entre os robôs.
3. Calcular o alinhamento das direções dos braços dos robôs.
4. Acionar jatos de ar dos atuadores a ar comprimido (8). Estes comandos são identificados com o pacote de dados I para identificação do robô, L ou R respectivamente para os conjuntos da esquerda e da direita, f para frente, r para trás e s para lateral. Também é informado o tempo de acionamento desejado. O letra T inicial identifica o comando acionamento de jato de ar.



Figura 8: Pacote de dados para acionamento dos jatos de ar

5. Movimentar os braços robóticos (Figura 9). O comando de movimentação do braço é realizado informando o ângulo de cada um dos 6 graus de liberdade do braço além do tempo desejado para o movimento.
6. Enviar via protocolo UDP comandos de atuação para os robôs (conexão wifi).

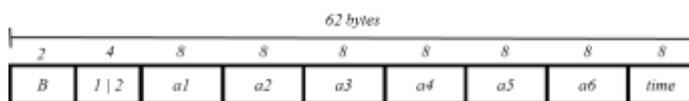


Figura 9: Pacote de dados para a movimentação do braço robótico do robô

Com esses comandos de atuação é possível posicionar e girar os robôs por sobre a mesa (Figura ) visando à obtenção do acoplamento. O resultado da movimentação é percebido pelo sistema de captura que realimenta o sistema de controle.

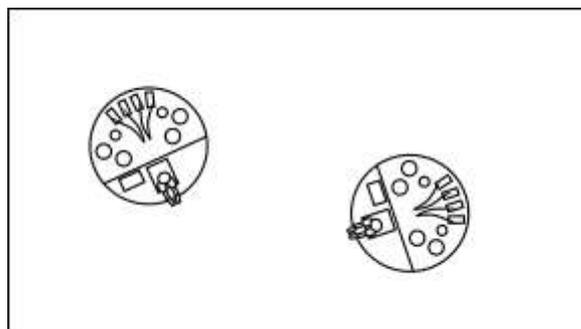


Figura 10: Posicionamento dos robôs na mesa

O algoritmo de controle deve implementar algumas ações que são fundamentais para realização das estratégias de acoplamento, mostradas a seguir

1. Implementação do loop de controle com a recepção de informações de entrada por meio de *listeners*, blocos responsáveis por continuamente receber informações a respeito do sistema de captura.
2. Implementação de uma árvore de decisão com a identificação de situações que merecem disparar eventos relacionadas à manobra de acoplamento.
3. Implementação dos eventos e suas respectivas rotinas associadas que são partes da manobra de acoplamento ou situações de sucesso ou falha da missão.
4. Implementação de um modelo de estados que determina em que fase o processo de acoplamento se encontra.

De acordo com a estratégia que sendo testada, uma nova codificação deverá ser realizada com base nessa visão macro da solução de acoplamento.

O robô possui uma unidade de processamento bem simples e é usada apenas para executar as ações recebidas pelo sistema de controle. O processador do robô é um micro controlador (Arduino Mega) que está conectada a um módulo de controle de servos motores. O micro controlador (Arduino) está conectada às válvulas de acionamento eletrônico para acionamento dos jatos de ar dos atuadores (figura 3). Os comandos recebidos são identificados e imediatamente executados pelo arduino que aciona os jatos ou envia o comando de controle ao módulo de controle dos servos motores que controlam os 6 graus de liberdade do braço robótico. O módulo de controle recebe o comando com a informação dos ângulos desejados para cada um dos servos motores do braço bem como o tempo desejado para que o movimento seja realizado.

Toda a lógica e estratégias a respeito da obtenção destes ângulos do braço robótico estão relacionadas ao algoritmo de acoplamento que não faz parte deste presente trabalho. O objetivo é o de criar o ambiente necessário para que estas estratégias sejam estudadas e elaboradas no futuro.

Desta forma o ciclo operacional do experimento se completa uma vez que a captura, controle e atuação alinhados aos objetivos da missão de acoplamento estejam sincronizados e integrados em um único sistema criando um conjunto de

recursos adequados para o estudo de movimentos de um braço robótico em uma base não inercial (móvel) que simula as operações típicas das missões de RVD/B em órbita.

## II. CONCLUSÃO

Esse artigo apresenta o sistema de inspeção e controle do movimento translacional-rotacional de um sistema robótico composto por dois manipuladores aero suportados por uma fina camada de ar (em torno de 4 *mícrons*) provida por cilindros de ar comprimido. O sistema de robôs flutuantes sobre ar permite simular computacionalmente operações típicas de missões espaciais de RVD/B, principalmente na parte final daquelas operações, conhecidas por aproximação de proximidade e acoplamento ou ancoragem. Nesse cenário o sistema de comunicação apresentado nesse artigo é fundamental para implementar as operações de controle e garantir o acoplamento entre os dois manipuladores.

## AGRADECIMENTOS

A FAPESP / PIPE (Projeto Aprovado 00882-4 / 2017 - Glaydson Luiz Bertoze Lima) apoiando os experimentos de laboratório.

A PG-PROAP / ITA pelo apoio para participar do IAC-18 Agência Espacial Brasileira (AEB) pelo apoio financeiro à realização de experimentos e pesquisas no laboratório de robótica espacial, Depto Mecatrônica / ITA.

## REFERÊNCIAS

- [1] Sutantyo, Donny. Decentralized underwater multi-robot communication using bio-inspired approaches. *Artificial Life and Robotics* [1433-5298], ano:2015 vol:20 fasc:2 pág:152 -158.
- [2] Hara, Shinsuke. New Paradigms in Wireless Communication Systems. *Wireless Personal Communications* [0929-6212], ano:2006 vol:37 fasc:3 pág:233 -241.
- [3] Dixon, Cory. Maintaining Optimal Communication Chains in Robotic Sensor Networks using Mobility Control. *Mobile Networks and Applications* [1383-469X], vol:14 fasc:3 pág:281 -291.
- [4] Das, Barnali. MRoCS: A new multi-robot communication system based on passive action recognition. *Robotics and autonomous systems* [0921-8890], ano:2016.
- [5] Gauthier, D. Interprocess communication for distributed robotics. *IEEE Journal of Robotics and Automation* [0882-4967], ano:1987 vol:3 fasc:6 pág:493 -504.
- [6] Ray, Adam A. , Roppel, Thaddeus A.. Cooperative robotics using wireless communication. Thesis(M.S.)-- Auburn University, 2005.
- [7] Jiang, Limei. Stable Formation Control of Multi-robot System with Communication Delay. *International journal of advanced robotic systems* [1729-8806], ano:2012 vol:9 pág:4.
- [8] Elise Lachat, Hélène Macher, Tania Landes and Pierre Grussenmeyer, Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect v2 Sensor) Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modeling, *Journal Remote Sensing*, 2015.
- [9] Kourosh Khoshelham and Sander Oude Elberink, Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications, *Journal Sensors*, 2012.
- [10] J.R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo and J. Gonzalez-Jimenez, Experimental Study of the Performance of the Kinect Range Camera for Mobile Robotics, Technical Report, 2014.