

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Fusão de dados para posicionamento aplicada a corrida de kart com elementos adicionais através de realidade aumentada

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Guilherme Fariello Interlandi

Florianópolis, Janeiro de 2016

Fusão de dados para posicionamento aplicada a corrida de kart com elementos adicionais através de realidade aumentada

Guilherme Fariello Interlandi

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Ubirajara Franco Moreno

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Ubirajara Franco Moreno
Orientador no Curso

Fernando Gonçalves
Avaliador

Roberta Silva Yakabi
Artur Mender Cook
Debatedores

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao meu pai por ajudar incondicionalmente e não me deixar desistir. Agradeço ao meu professor orientador Ubirajara pela ajuda para transpor certos obstáculos e para confeccionar este documento. Agradeço também a empresa Hexagon Agriculture pelo empréstimo de equipamentos sem os quais esta pesquisa poderia não ter sido concluída.

Resumo

Este projeto não foi realizado em uma empresa, ele partiu de uma idéia pessoal e teve somente a supervisão do orientador. O que motivou este projeto foram duas características presentes em corridas amadoras de kart que podiam ser melhoradas. Primeiro foi a dificuldade de ocorrer ultrapassagens, uma vez que por falta de habilidade, um corredor pode ficar minutos ou até uma corrida inteira atrás de outro corredor mais lento. Segundo, diferenças de peso e habilidade dos jogadores e muitas vezes da regulagem do kart podem fazer com que um jogador adquira uma grande distância entre os outros competidores, causando assim desânimo e descontentamento nestes que percebem que não conseguirão ganhar. Com o intuito de solucionar estes problemas e adicionalmente aumentar o divertimento nas corridas, surgiu a idéia de implementar uma versão real do jogo Mario Kart[®]. Mario Kart para quem não conhece, é um jogo produzido pela empresa japonesa Nintendo, onde os jogadores controlam personagens dirigindo karts e além das capacidades óbvias de manobrar, acelerar e frear o veículo, os jogadores podem também adquirir itens no decorrer da corrida que podem lhe trazer benefícios como aumento de velocidade ou podem causar malefícios ao adversário, como redução de sua velocidade. Foi observado o fator de minimização do custo total do sistema para facilitar a sua replicação caso venha a ser aplicada comercialmente. Ao final do projeto foi produzido um kart protótipo equipado com um sensor de posição desenvolvido e um sistema de controle de potência, bem como o protocolo e infraestrutura de comunicação com um computador fixo e o software que roda neste computador para que sejam calculadas as interações entre o kart e o mundo virtual.

Abstract

This project was not carried out in a business, he set a personal idea and only had the oversight of the supervisor. What motivated this project were two features present in amateur racing kart that could be improved. First was the difficulty of overtaking occurs, since for lack of skill, a runner can be minutes or even an entire race behind another slower runner. Second, differences in weight and skill of the players and often the kart adjustment may cause a player to acquire a large distance between the other competitors, thus causing dismay and discontent those who realize that they cannot win. In order to solve these problems and further increase the fun at the races, the idea of implementing a real version of the game Mario Kart®. Mario Kart for those unfamiliar, is a game produced by the Japanese company Nintendo, where players control characters driving karts and beyond the obvious ability to maneuver, accelerate and brake the vehicle, players can also acquire items during the race that may bring benefits such as increased speed or may cause harm to the opponent, such as reducing they speed. Minimizing the total cost factor system has been considered to facilitate its replication in case it is applied commercially. At the end of the project it has produced a kart prototype equipped with a developed position sensor and a power control system as well as the protocol and communications infrastructure with a fixed computer and the software that runs on this computer so that the interactions are calculated from the kart and the virtual world.

Sumário

Capítulo 1: Introdução	9
1.1: Motivação.....	9
1.2: Objetivos	10
Capítulo 2: Desenvolvimento do projeto	11
2.1: Sistemas de posicionamento	11
2.1.1: Alternativas comerciais.....	11
2.1.2: Sistema de posicionamento global	13
2.1.3: Sistema de posicionamento inercial	15
2.1.4: Acelerômetros e giroscópios	15
2.1.5: Fusão sensorial e Filtro de Kalman	17
2.1.6: Estimação.....	18
2.1.7: Atualização	19
2.2: Métodos para aumento da precisão.....	20
2.2.1: Fontes de erros da IMU	20
2.2.2: Procedimentos de calibração	21
2.2.3: GPS diferencial (DGPS) e RTK.....	23
2.2.4: Implementação de um sistema DGPS-RTK	25
2.3: Computador embarcado	26
2.3.1: Opções no mercado	27
2.4: Realidade virtual X realidade aumentada	29
Capítulo 3: Resultados e considerações finais	31
3.1: Controle de Potência.....	31
3.2: Sistema de posicionamento	33

3.3: Interface gráfica	37
3.3.1: Biblioteca gráfica Ogre3D.....	38
3.3.2: Testes.....	40
Conclusões e Discussões.....	42
Referências:	43

Capítulo 1: Introdução

1.1: Motivação

O ramo do automobilismo profissional gira anualmente bilhões de dólares em modalidades como a Fórmula 1 [15] e a Nascar Race [16] e é também responsável por outros milhões de dólares indiretamente devido ao grande público que é atraído pela velocidade e acaba por competir nas modalidades mais baratas e menos arriscadas.

Dentre as modalidades amadoras, a mais famosa é a corrida de kart pois é praticada tanto para recreação quanto como porta de entrada para as modalidades profissionais. O kart é um veículo automotor de quatro rodas, como visto na Figura 1, considerado altamente seguro pois possui baixa estatura e relativamente baixa potência reduzindo drasticamente o risco de capotamentos e acidentes com lesão, podendo assim ser praticado por quase qualquer pessoa, incluindo crianças.



Figura 1 - Exemplo de kart. Fonte: [18]

Naturalmente, dentre as regras implícitas de uma corrida está o mútuo cuidado com o bem-estar e saúde física dos participantes, descartando-se então o contato entre seus veículos. Sendo assim, as ultrapassagens que são um dos pontos altos da corrida, acabam ocorrendo menos frequentemente. Outra característica intrínseca de corridas e que afeta principalmente o ramo amador devido a heterogeneidade dos

competidores é o fato de que corredores mais habilidosos ou com veículos mais potentes, tendem a adquirir grande distância de seus oponentes, que por sua vez tendem a desanimar pois percebem que não será possível alcançar o objetivo de chegar em primeiro lugar.

Além deste mercado milionário, outros dois mercados do ramo de entretenimento estão sendo criados atualmente e abrem portas para inúmeras possibilidades, a realidade virtual e a realidade aumentada. Ambos os conceitos não são exatamente recentes, a primeira citação do termo realidade virtual é datada da década de 50 [2][3], porém o grande impulso para a sua utilização só começou nos dias de hoje devido a miniaturização dos componentes eletrônicos e do grande poder de processamento e memória.

1.2: Objetivos

Neste trabalho se busca implementar um jogo que permitisse maior interação entre os competidores e mais dinamicidade na disputa de posições. O jogo desenvolvido foi inspirado no jogo Mario Kart®. Visando o desenvolvimento do jogo alguns objetivos específicos foram determinados:

- Preparação de um kart para protótipo com controle eletrônico de potência;
- Definir soluções de posicionamento em tempo real para o kart;
- Estabelecer um ambiente gráfico para a visualização do kart em ambiente virtual, com elementos modificadores da dinâmica do jogo.
- Desenvolver um sistema de comunicação eficiente para comunicação entre os karts.

Capítulo 2: Desenvolvimento do projeto

2.1: Sistemas de posicionamento

O sistema de posicionamento deve ser capaz de estimar a posição do veículo no plano tangente a superfície terrestre (descartando-se a altura que possui variação mínima) em relação a uma referência fixa e também estimar a direção a qual o veículo se desloca (também conhecida como “yaw”) neste plano. Este sistema é necessário para mapear a posição real do kart no mundo virtual, e assim calcular as interações do kart do jogador com os elementos virtuais. A seguir serão apresentados os tipos de sensores e teorias utilizadas para resolver este tipo de problema.

2.1.1: Alternativas comerciais

Soluções comerciais de posicionamento foram avaliadas comparando performance e preço, para verificar a aplicabilidade no projeto. Na Tabela 1 estão listados alguns dos dispositivos encontrados sendo que todos eles utilizam a tecnologia de “GPS aided INS” [4][5][6] (de tradução livre para “sistema de navegação inercial auxiliado por gps”, que será explicado mais a diante).

Tabela 1 - Algumas soluções comerciais

Solução	Fabricante	Frequência de amostragem (Hz)	Preço (U\$\$)	Foto
VN-200	Vectornav	200	2.600,00	Figura 2
Spatial	Advanced Navigation	1000	2.500,00	Figura 3
MTi-G-700	Xsens	2000	4.100.00	Figura 4



Figura 2 - VN-200



Figura 3 - Spatial



Figura 4 - MTi-G-700

Além da faixa de preço inviabilizar a aquisição destes dispositivos, praticamente todos os seus fabricantes estão localizados nos Estados Unidos que possui restrições para a exportação de equipamentos desta natureza devido a

possibilidade de utilização bélica. Neste contexto, a solução encontrada foi criar um sistema de posicionamento semelhante a partir de seus componentes básicos.

Um dispositivo “*GPS aided INS*” é composto basicamente de três elementos, um sensor inercial tri-axial, um receptor de sinal de GPS e um algoritmo que irá realizar a fusão das estimativas destes dois sensores. Estes elementos serão explicados detalhadamente a seguir.

2.1.2: Sistema de posicionamento global

De acordo com VETORAZZI et al (1994), o sistema GPS está baseado no sistema de satélites NAVSTAR pertencente ao governo americano e monitorado ininterruptamente pelo seu departamento de defesa. Seu uso civil foi liberado somente em 1980. Para que os GPS funcionem corretamente, faz-se necessário o uso de três componentes, chamados de: espacial, de controle e o receptor. O espacial é composto de vinte e sete satélites que se encontram em órbita. Vinte e quatro deles estão ativos e três são os “reservas”, que entram em operação caso ocorra alguma falha com um dos satélites principais. Estes satélites estão dispostos de tal forma que no mínimo existam cinco deles visíveis para qualquer ponto da terra e a qualquer momento. Devido à grande altitude em que os satélites se encontram, suas órbitas se tornam muito estáveis, pois quase não sofrem resistência atmosférica.

O segundo componente, de controle, representa as estações de controle dos satélites. Ao todo são cinco estações espalhadas pelo globo terrestre. As estações rastreiam os satélites continuamente, calculam seus caminhos e coeficientes de correção dos relógios e os transmitem para cada satélite pelo menos uma vez por dia.

O último componente é o receptor GPS. Cada satélite envia sinais com seus códigos de identificação e a hora que este sinal foi enviado assim os receptores conseguem saber quanto o sinal viajou, sabendo quanto tempo ele demorou para chegar. A partir do tempo em que o sinal foi transmitido (t_T), tempo em que o sinal foi recebido (t_r) e a velocidade da luz (c_0), pode-se calcular a distância entre o receptor e o satélite por meio da equação (2.1):

$$d = c_0(t_r - t_T) \quad (2.1)$$

Idealmente, com base em três medidas de distância seria possível utilizar trilateração e medir a posição do receptor, porém como os relógios do receptor e dos emissores não estão sincronizados, existe uma alta granularidade no relógio do receptor e o sinal está suscetível a várias fontes de ruído, é necessária uma quarta medição para se ter uma estimativa considerada suficiente, processo exemplificado na Figura 5. Caso haja a recepção de sinal de mais de quatro satélites, os sinais excedentes também podem ser levados em consideração para minimizar o erro.



Figura 5 – Trilateração. Fonte: [19]

Existem dois fatores que impedem a utilização do GPS como solução única para o problema de posicionamento, a baixa precisão e a baixa frequência de amostragem. A imprecisão do GPS é causada por erros como (Figura 6): multicaminho, atrasos na ionosfera e troposfera, atenuação do sinal e erro no relógio do satélite e do receptor, resultando numa acurácia padrão na maioria dos fabricantes de dois metros e meio. Já a frequência também é padrão entre os fabricantes e nos receptores de baixo custo são limitadas a cinco e vinte Hertz.

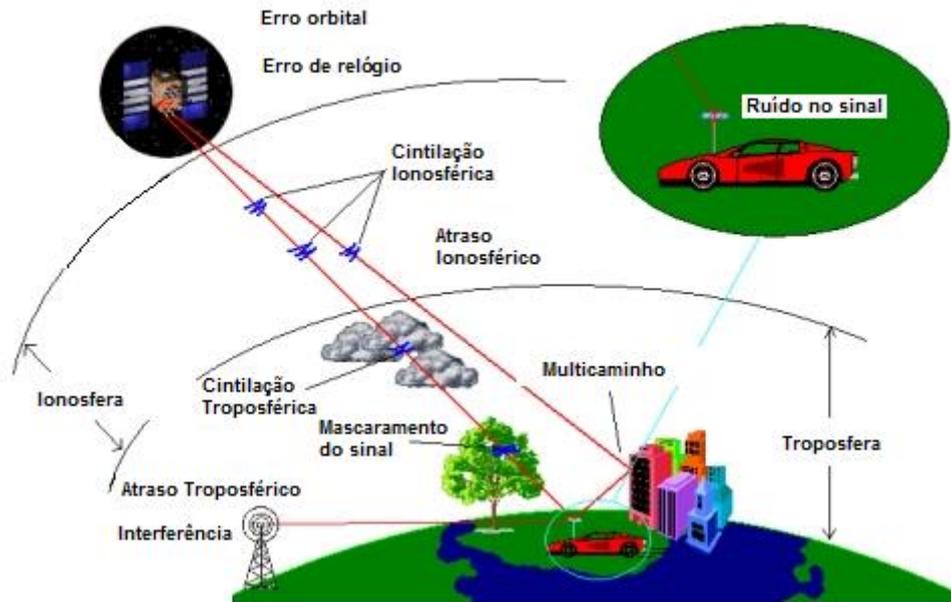


Figura 6 - Diferentes tipos de interferência. Fonte: [20]

2.1.3: Sistema de posicionamento inercial

A navegação inercial é uma forma de posicionamento independente de qualquer sinal transmitido externamente como o GPS, atualizando seus dados continuamente e em alta frequência. Esse sistema não requer a emissão ou recepção de sinais e é imune a interferências. Ele se baseia em sensores inerciais, comumente chamados de IMU (do inglês, “*Inertial measurement unit*”), que medem a aceleração do corpo e também a sua taxa de rotação (velocidade angular). A partir da integração numérica dos dados destes sensores é possível obter a posição do corpo relativo ao ponto absoluto em que ele estava quando as medidas começaram a ser realizadas. Este tipo de sistema, quando utilizado sem nenhum auxílio, não disponibiliza a posição do corpo em relação a um referencial. Este sistema está sujeito a erros de integração e a integração indeterminada dos erros de medição, tornando então as suas medidas irrelevantes para grandes períodos de tempo.

2.1.4: Acelerômetros e giroscópios

Os acelerômetros se baseiam nos princípios das duas primeiras leis de Newton. Segundo a primeira lei de Newton: “todo corpo permanece em repouso até

que alguma força externa aja sobre ele”. Já a segunda lei define a força aplicada como o produto da massa do corpo pela sua aceleração. Logo, medindo a aceleração aplicada sobre um corpo (e seu peso), é possível determinar a força aplicada sobre ele. Atualmente praticamente todos os acelerômetros vem encapsulados em circuitos eletrônicos extremamente leves e pequenos devido a tecnologia MEMS (micro electro-mechanical systems), tornando sua aplicação tão facilitada que quase todos os celulares atualmente possuem estes dispositivos. Devido aos três graus de liberdade de movimento do acelerômetro no espaço, muitos encapsulamentos já possuem três acelerômetros posicionados perpendicularmente entre si para a percepção total da aceleração agindo sobre o corpo nos três eixos de coordenadas.

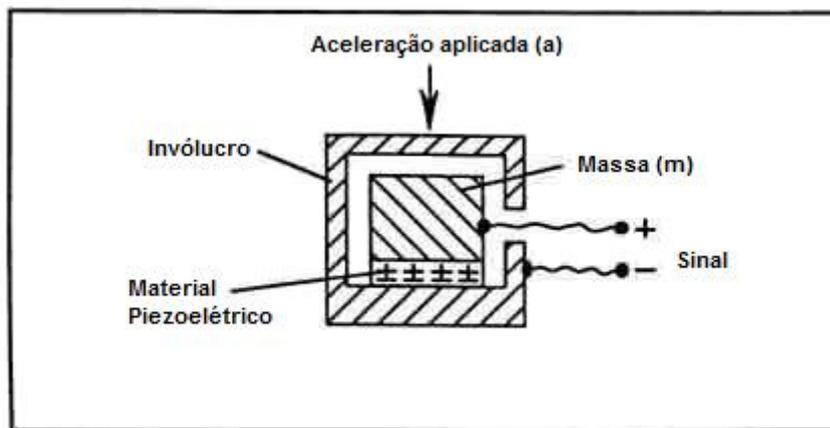


Figura 7 - Exemplo de acelerômetro piezoelétrico. Fonte: [21]

Um fato peculiar sobre os acelerômetros é que eles fornecem a aceleração do corpo somada com a reação do corpo à aceleração da gravidade. Sua descrição matemática simplificada é dada pela seguinte equação (2.2) :

$$\vec{f} = \vec{a} - \vec{g} \quad (2.2)$$

Os giroscópios medem a velocidade angular do corpo sobre um certo eixo de rotação e geralmente são distribuídos e encapsulados das mesmas formas citadas anteriormente para o acelerômetro, ou até mesmo distribuído junto com um acelerômetro por suas naturezas complementares.

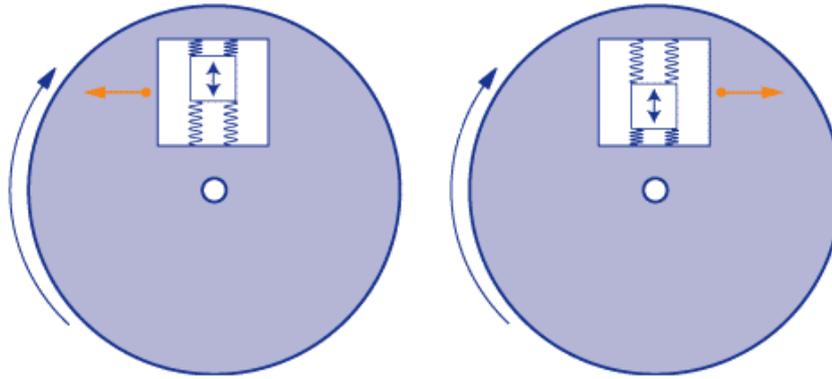


Figura 8 - Funcionamento de um giroscópio MEMS. Fonte: [22]

Quando o giroscópio sofre uma rotação, uma pequena massa ressonante é deslocada, gerando um pequeno sinal elétrico que é então amplificado e digitalizado.

Ressaltando novamente suas características, sensores inerciais são capazes de serem amostrados em altas frequências e conseqüentemente através de alguns cálculos pode se obter a velocidade e posições linear e angular do corpo em alta frequência, mas com a desvantagem da falta de referencial global e com erros que se acumulam indefinidamente.

2.1.5: Fusão sensorial e Filtro de Kalman

Considerando as naturezas complementares do GPS e da IMU, foram avaliados diferentes algoritmos disponíveis na literatura capazes de integrar as medidas de ambos os sistemas e mitigar suas fraquezas. A técnica predominantemente utilizada na robótica móvel, visão computacional e outros setores, como mostrado também na sessão dos dispositivos já existentes, é o filtro de Kalman.

O filtro de Kalman é uma ferramenta estatística criada por Rudolf Kalman. Seu propósito é utilizar medições de grandezas realizadas ao longo do tempo (contaminadas com ruído e outras incertezas), gerando resultados que tendam a se aproximar dos valores reais das grandezas medidas.

O Filtro de Kalman (FK) produz estimativas dos valores reais de grandezas medidas e valores associados predizendo um valor (etapa de predição), estimando a incerteza do valor predito e calculando uma média ponderada entre o valor predito e o valor medido (etapa de atualização). O peso maior é dado ao valor de menor

incerteza. As estimativas geradas pelo método tendem a estar mais próximas dos valores reais que as medidas originais pois a média ponderada apresenta uma melhor estimativa de incerteza que ambos os valores utilizados no seu cálculo.

Originalmente, o FK foi arquitetado para sistemas lineares, mas foi só questão de tempo para que surgissem variantes que poderiam ser aplicadas a sistemas não-lineares como o filtro de Kalman estendido (EKF, do inglês Extended Kalman Filter) e o Unscented Kalman Filter (UKF). O EKF é utilizado em sistemas em que sua linearização no ponto de operação tem uma precisão satisfatória, já o UKF é usado nos demais. Neste projeto foi utilizado o EKF que será detalhado a seguir, mas sem detalhes construtivos por motivos comerciais.

2.1.6: Estimação

Nesta etapa são utilizados os dados da IMU para se estimar o novo estado do sistema, baseando-se no estado atual. Primeiramente deve-se estabelecer uma relação entre as medidas dos sensores e as observações do sistema, também conhecida como matriz de observação e pode ser descrita na equação (2.3) em tempo discreto:

$$z_k = H_k x_k + e_k \quad (2.3)$$

Sendo z_k o vetor de observações, H_k a matriz de observação do sistema, x_k o vetor de medições dos sensores e e_k o ruído de medição.

O passo seguinte descreve o sistema como um sistema linear, ou seja, se estabelece uma relação matricial entre o estado seguinte e o estado atual. Esta matriz que relaciona os dois estados é chamada de modelo do processo e o sistema de equações tem a seguinte definição (2.4):

$$\hat{x}_{k+1}^- = \Phi_k \hat{x}_k^+ + w_k \quad (2.4)$$

Sendo \hat{x}_{k+1}^- o próximo estado do sistema, Φ_k a matriz de transição de estados, \hat{x}_k^+ o estado atual do sistema, w_k o ruído do processo. Onde o “chapéu” (^) representa a quantidade estimada, o sobrescrito “-” representa a quantidade predita (antes da medição de atualização), e o sobrescrito “+” representa a quantidade atualizada (depois da atualização da medição). O ruído do processo é caracterizado como a soma dos erros

provenientes de dinâmicas desconhecidas do sistema e da linearização. Φ_k é obtida através da linearização da matriz de dinâmica do sistema, modelada em tempo contínuo. Outra variável estimada nesta etapa é a matriz de covariância do erro de estimação P , utilizada posteriormente na etapa de atualização e definida pela equação (2.5):

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (2.5)$$

2.1.7: Atualização

A atualização é executada a cada nova medição do GPS e é responsável pela redução do erro acumulado durante a estimação. Nesta etapa que o filtro de Kalman mostra todo seu potencial, pois através da covariância calculada da estimação e da covariância suprida pelo GPS, é calculado um ganho, chamado de ganho de Kalman que ponderará entre a estimação e a atualização gerando uma terceira medida que minimiza o erro quadrático. O cálculo desta nova medida é dado pelas seguintes equações:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + P_k)^{-1} \quad (2.6)$$

$$\underline{v}_k = \underline{z}_k - H_k \hat{\underline{x}}_k^- \quad (2.7)$$

$$\underline{x}_k^+ = \underline{x}_k^- + K_k \underline{v}_k \quad (2.8)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (2.9)$$

Nestas equações, K_k representa o ganho de Kalman e \underline{v}_k descreve a inovação inserida no sistema na atualização. Esta inovação é um dos medidores de performance do filtro de Kalman pois um filtro bem construído deve apresentar média nula e distribuição normal com variância menor que as variâncias de estimação e atualização. Na última equação podemos ver que a covariância de estimação também é atualizada nesta etapa. A figura a seguir mostra o ciclo de trabalho do sistema de posicionamento:

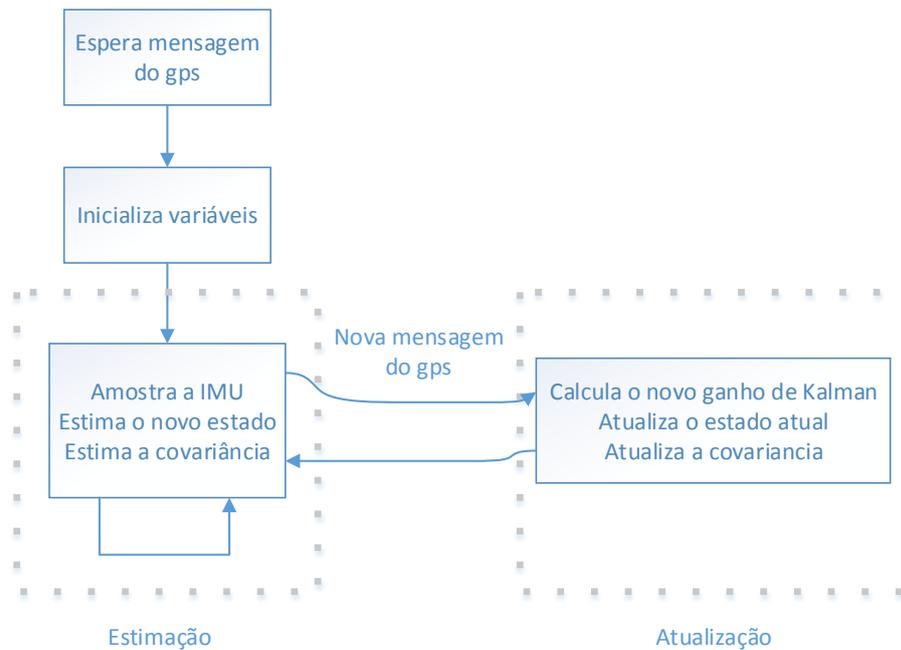


Figura 9 - Ciclo do sistema de posicionamento

2.2: Métodos para aumento da precisão

Para atingir o objetivo de uma precisão semelhante aos equipamentos comerciais com custo dez vezes maior que dos sensores utilizados, foram avaliadas alternativas de se compensar os defeitos dos componentes de baixo custo do sistema.

2.2.1: Fontes de erros da IMU

As medidas de sensores em geral, não só de posicionamento, são corrompidas por erros estocásticos e determinísticos. O erro estocástico, também chamado de aleatório, é formado pela somado de diversos fatores que não podem ser mensurados mas afetam a medida do sensor e é considerado tendo distribuição normal. Dentre os fatores que podem gera-lo podemos citar oscilações elétricas, magnéticas e vibrações mecânicas. Erros determinísticos, também chamados de sistemáticos, podem ser estimados e compensados, tendo seu efeito praticamente cancelado [8]. As fontes mais conhecidas de erros sistemáticos nesta categoria de sensores são [8]:

- Bias – Uma componente constante somada na saída do sensor, geralmente expressada pela letra “ b ”. Na equação (2.10), \tilde{x} representa a grandeza medida, x a medida real e b o bias.

$$\tilde{x} = x + b \quad (2.10)$$

- Escala – Um erro proporcional a magnitude medida, representado pela letra “s”. Na equação (2.11), \tilde{x} representa a grandeza medida, x a medida real e s o erro de escala.

$$\tilde{x} = (1 + s)x \quad (2.11)$$

- Sensibilidade cruzada entre eixos ou desalinhamento – Pequenos erros na construção do equipamento tornam os eixos não precisamente perpendiculares acarretando em influencias mutuas entre as medidas dos eixos, representada também pela letra “s” mas com um índice indicando a qual eixo este parâmetro é referente. Na equação (2.12)(2.11), \tilde{x} representa a grandeza medida, x a medida real, y a magnitude medida no eixo “y” e s_{xy} o erro de desalinhamento entre x e y .

$$\tilde{x} = x + s_{xy}y \quad (2.12)$$

Outras fontes de erros como a sensibilidade cruzada entre giroscópio e acelerômetro podem ser desprezadas, pois não contribuem expressivamente na precisão requerida ou sua magnitude tão pequena que é mascarada pelo ruído aleatório.

Uma questão importante é que estes parâmetros não são constantes, e podem variar tanto em função do tempo quanto da temperatura, uma vez que são constituídos de componentes eletrônicos e valores de resistores e transistores são sensíveis a variação de temperatura e fadiga.

2.2.2: Procedimentos de calibração

Um procedimento de calibração basicamente expõe o sensor a condições conhecidas e estima o parâmetro comparando suas medidas com o valor imposto. A maioria dos procedimentos adotados neste projeto são executados “*off-line*”, ou seja, antes da montagem do sistema final, dada impossibilidade de executá-lo “*online*”, ou mesmo devido aos parâmetros da IMU sofrerem pequena variação com a temperatura

e fadiga. O único parâmetro estimado “*online*” é o bias do giroscópio que apresenta grande volatilidade e é de grande importância para o desempenho do sistema.

Nos procedimentos utilizados neste projeto, devido ao erro aleatório é necessário que seja feita a média de pelo menos 50 medidas para se ter uma boa estimativa.

O bias do giroscópio é estimado uma vez quando o sistema se encontra em repouso. Nesta condição todas as suas medidas deveriam ser iguais a zero, levando a equação (2.13).

$$\tilde{x} = 0 + b \quad (2.13)$$

Este parâmetro pode ser determinado de duas maneiras. Na primeira, deve-se fixar o sensor em um motor de velocidade conhecida, um eixo de cada vez deve ser colocado perpendicular ao eixo de rotação, e comparar as medidas deste eixo com o valor do motor. Este processo segue as equações (2.14) e (2.15) onde \tilde{x} descreve o valor medido e \hat{x} o valor imposto.

$$\tilde{x} = (1 + s)\hat{x} \quad (2.14)$$

$$s = (\tilde{x}/\hat{x}) - 1 \quad (2.15)$$

A estimação dos parâmetros do acelerômetro é um pouco mais complexa. Na calibração da escala do giroscópio tínhamos somente o problema do alinhamento do sensor com o eixo de rotação do motor, porém como no acelerômetro a referência utilizada é a aceleração da gravidade, seria necessário não somente posicioná-lo paralelamente à uma superfície, mas também que esta superfície fosse perfeitamente perpendicular ao vetor gravitacional.

Muitos laboratórios utilizam esta configuração para calibração, porém ela possui um alto custo de implementação. Neste projeto outro método de calibração que não necessita de alinhamento com a gravidade foi utilizado. Nele, são obtidas medidas do acelerômetro em posições angulares diferentes, sendo a quantidade de posições necessárias relativa à quantidade de parâmetros a serem estimados, por exemplo, se só o bias for estimado devem ser feitas três ou mais posições. Após os recolhimentos

destas medidas é utilizado um algoritmo de otimização não-linear, geralmente gradiente-descente, para encontrar os parâmetros que minimizam a função erro que é dada como a soma da diferença quadrática entre a magnitude do vetor calibrado do acelerômetro e a da gravidade [8].

Considerando $f(\vec{x}, \vec{p})$, onde \vec{x} é o vetor da medida tri-axial e \vec{p} o vetor de parâmetros de erro, a função que retorna a medida do acelerômetro compensada dos parâmetros de erro, a função a ser otimizada é descrita em (2.16), onde “ n ” representa o número de medidas do acelerômetro e \vec{g} o vetor da gravidade.

$$h(\vec{x}, \vec{p}) = \sum_{i=1}^n (|\vec{g}| - |f(\vec{x}_i, \vec{p})|)^2 \quad (2.16)$$

2.2.3: GPS diferencial (DGPS) e RTK

Para este projeto foi definido que uma precisão aceitável para o posicionamento seria da ordem de centímetros para se ter um grau de realismo aceitável. A precisão do GPS de baixo custo gira em torno de dois metros, muito aquém desta precisão definida. Com o intuito então de atingir erros da ordem de centímetros foi buscada a implementação de um sistema de GPS diferencial, mais precisamente com a tecnologia RTK.

O conceito diferencial é aplicável a qualquer sistema que contenha erros capazes de serem identificados por um equipamento externo e com capacidade de comunicação com o usuário (que normalmente não é capaz de computar estes erros por si próprio através dos equipamentos de que dispõe). A eliminação destes erros permite que o usuário reduza significativamente o erro total induzido pelo sistema "não diferencial".

Para o caso do GPS, os erros associados aos satélites, à propagação das ondas no meio e todos os erros associados ao GPS (excluídos os erros particulares do usuário, tais como erros do receptor e multi-path), podem ser compensados e possibilitar um sensível aumento da precisão da posição. Por exemplo, as categorias

de pouso automático de precisão de aeronaves só são viáveis com a utilização do DGPS. Sem o DGPS apenas categorias "não-precisa" são possíveis.

O DGPS também utiliza um segundo receptor de sinal GPS, fixo, colocado em um ponto com coordenadas absolutamente precisas e que recebe os sinais dos mesmos satélites recebidos pelo receptor do usuário. Este receptor é chamado de "Estação de Referência". O receptor da estação de referência compara, então, as posições informadas pelos satélites, com aquelas que possui armazenadas em um computador acoplado ao receptor. Por diferença, o erro de cada satélite é detectado e transmitido (geralmente via um sinal de rádio) para o receptor do usuário (receptor diferencial).

O receptor do usuário, com capacidade diferencial, recebe, então, dois tipos de sinais: um, fornecido por quatro ou mais satélites (sinal GPS), contendo as informações de distância, ainda com erro relativamente grande; o outro sinal (sinal diferencial) contém as informações dos erros de cada satélite, calculados pela estação de referência. Os dois tipos de informação são processados e o resultado é o sinal DGPS, ou seja, o sinal GPS depurado da maior parte de seus erros. No infográfico da Figura 10 temos uma visualização do funcionamento desse sistema e de seu fluxo de informação.

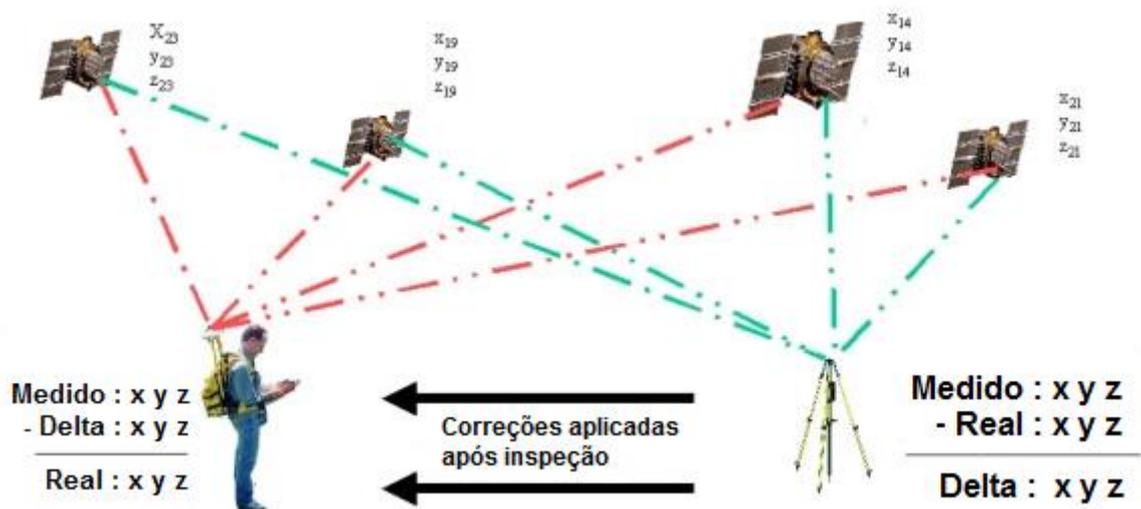


Figura 10 - Demonstrativo do funcionamento do DGPS. Fonte: [23]

A tecnologia RTK (do inglês, Real-Time kinematics) é uma modalidade de DGPS porém as medições das posições relativas dos satélites não é feita através do

conteúdo da mensagem recebida e sim através da medição da fase da onda portadora. A portadora da transmissão mais comum, a L1, tem frequência de 1575.42 MHz correspondendo a um comprimento de onda de 19cm, um erro de estimação de fase de $\pm 1\%$ ocasiona um erro de apenas 1.9mm. Sua precisão nominal é de ± 5 cm.

2.2.4: Implementação de um sistema DGPS-RTK

A tecnologia DGPS e RTK não é de última geração, contando inclusive atualmente com implementações “*Open-source*” e sem custo como a RTKlib [1], biblioteca escolhida para ser utilizada neste projeto. A RTKlib é licenciada para uso comercial e não-comercial, oferece uma variedade de ferramentas e é compatível com a maioria dos protocolos do mercado, o único fator que limita a sua utilização ostensiva é o fato que o receptor GPS tem que dar suporte a mensagens do tipo “*raw*” (crua) que possui os dados da fase da portadora para que os cálculos RTK possam ser realizados.

Na escolha da estação base, a RTKlib possibilita a criação de uma, caso necessário, transmitindo os dados de correção via wireless através de uma conexão TCP. Também há a possibilidade de utilizar os dados advindos de uma base estabelecida pelo governo, através de um protocolo chamado NTRip pela internet. Na Figura 11 podemos ver a expressiva diferença entre as medidas convencionais do gps (em rosa) e das medidas compensadas no sistema DGPS-RTK (em verde) onde foi realizada uma trajetória circular.

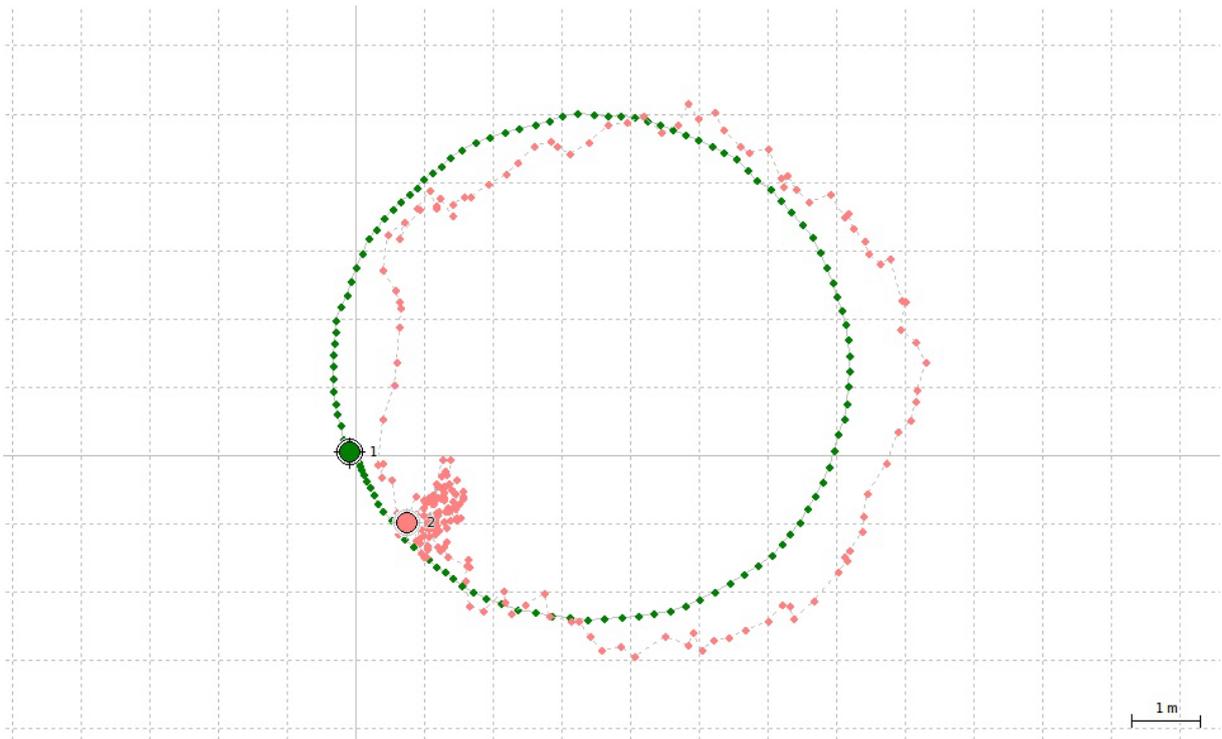


Figura 11 - Diferença entre sinal GPS (rosa) e DGPS-RTK (verde). Fonte: [24]

2.3: Computador embarcado

Um sistema embarcado é um sistema microprocessado encapsulado voltado exclusivamente para uma aplicação específica, diferentemente de computadores de propósito geral como os nossos computadores pessoais. Um computador embarcado apresenta diversas qualidades requeridas neste projeto, dentre elas podemos citar:

- Dimensões reduzidas
- Baixo consumo de energia
- Baixo custo de aquisição
- Relativamente alta resistência mecânica (em comparação com computadores pessoais), uma vez que todos seus componentes são de estado sólido (sem HD's de disco, por exemplo).
- Pinos para conexão de baixo nível (nível lógico), capazes de conversões A/D, leituras de sensores On/Off, comunicação I2C e de controlar servos motores.

Mesmo com todas estas vantagens a maioria das capacidades relativas a um computador convencional ainda são mantidas como conexões de vídeo, áudio e USB e conexão com a internet. A única desvantagem é que a capacidade dos componentes internos é menor, ou seja, processadores mais lentos e memórias menores.

2.3.1: Opções no mercado

O mercado de computadores embarcados se aqueceu muito nos últimos anos devido a alguns fatores como a miniaturização dos componentes eletrônicos e de invenções impulsionadoras como o Arduino. O Arduino foi uma criação inovadora na área de microcontroladores, que visou estabelecer um padrão de construção e programação para processadores ATmega, com esquemáticos e código fonte abertos ao público, tornando seu uso muito mais prático e o aprendizado mais rápido. Nesta mesma linha de pensamento surgiram encapsulamentos de processadores mais potentes da arquitetura ARM® e capazes de rodar um sistema operacional. A seguir podemos ver uma lista com os equipamentos considerados para este projeto.

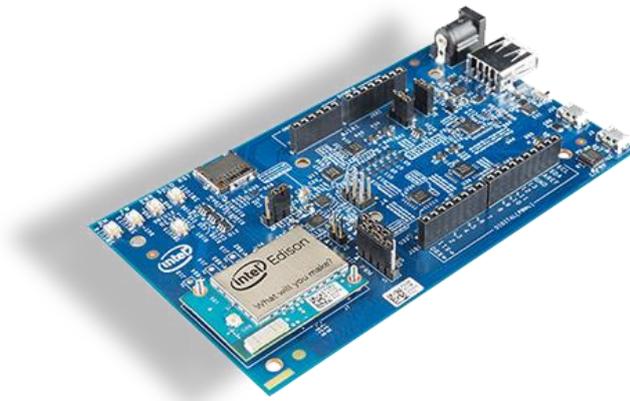


Figura 12 - Intel Edison

Intel Edison:

- Suporte a comunicação via: UART, I2C, SPI, I2S, USB, Wifi e bluetooth.
- 40 pinos GPIO (do inglês, General Purpose Input Output).
- Processador Intel dual-core de 500 Mhz
- Preço: R\$400,00

- Processador ARM 700 Mhz
- Preço R\$ 180,00

Dentre estes computadores foi julgado que o que melhor se adequa ao projeto é a BeagleBone Black, devido as dimensões reduzidas, baixo preço, boa potência de hardware e comunidade intensamente ativa.

2.4: Realidade virtual X realidade aumentada

Quem não está inteirado do assunto pode acabar se confundindo com estes termos. Realidade virtual é a mais conhecida, é a tecnologia que está definindo o rumo de grandes empresas de tecnologia como Facebook, Sony e Samsung. Para esse tipo de interação, é necessário que o usuário utilize um aparelho nos olhos, como Oculus Rift ou Google Cardboard, e que o ambiente virtual seja criado em um modelo 3D ou foto/filme orbitais. A realidade virtual cria um mundo completamente novo, interativo e reativo. Ela deve ser vista como outra realidade e nela o usuário estará dentro da interface podendo simular ações e movimentos imersos em um ambiente, possibilitando uma experiência multissensorial em tempo real. Podemos ver na Figura 15 uma pessoa jogando um jogo em realidade virtual e em seu monitor está a mesma imagem que está sendo reproduzida no Oculus Rift, dando uma sensação de imersão.



Figura 15 - Exemplo de realidade virtual. Fonte: [26]

A realidade aumentada atua como uma ponte entre o mundo físico e digital, adicionando elementos ao mundo ao redor, como visto na Figura 16. Não se trata de

uma nova realidade criada, mas sim da inserção de informações e objetos virtuais no mundo real ao redor usuário a partir de referenciais determinados. Ou seja, ao invés de entrarmos num mundo tridimensional, é o 3D que imerge no mundo ao nosso redor. Através de imagens, objetos ou pontos geográficos, que funcionam como gatilhos e disparam diversas ações, os usuários recebem mais informações, interatividade e movimento com um aspecto lúdico.



Figura 16 - Exemplo de realidade aumentada. Fonte: [27]

Capítulo 3: Resultados e considerações finais

Este capítulo descreve as contribuições geradas neste projeto, como também discute sua performance e particularidades. Utilizando todos os conceitos previamente apresentados, foi proposto um protótipo inicial do sistema com as seguintes características:

- Controle eletrônico de potência do kart através do computador embarcado;
- Sistema de posicionamento baseado na fusão sensorial de uma IMU e um GPS;
- Interface gráfica renderizada e computação de eventos realizadas em um computador (servidor) localizado nas proximidades da pista.
- Comunicação entre kart e servidor feita via wireless.

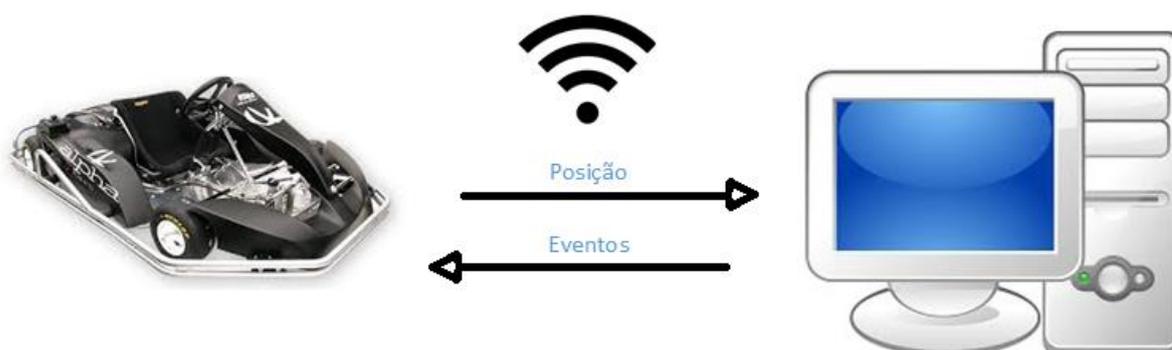


Figura 17 - Infográfico do sistema final. Adaptado de [25]

Um teste de integração utilizando propriamente o kart numa pista não pôde ser realizado, pois o kart adquirido apresentou problemas no motor que devido a restrição de tempo não foi possível resolve-lo, porém todos os componentes foram validados ou no kart parado ou utilizando um carro.

3.1: Controle de Potência

Uma das formas de interação entre o real e o virtual que aumentaria a competitividade do jogo é a possibilidade de diminuir a potência do kart adversário ou de aumentar a própria. Para karts movidos à motor de combustão isso significa ter

controle eletrônico sobre a admissão de combustível. Como já estava sendo utilizado um computador embarcado com pinos PWM e conversores A/D, a solução escolhida foi utilizar um servomotor (Figura 18) controlando a abertura da admissão e um potenciômetro rotativo no pedal para medir o quanto o usuário o pressiona. Sendo assim, durante a maior parte da corrida o computador aciona o servomotor proporcionalmente ao pressionamento do pedal, mas quando o usuário é atingido o curso máximo do motor é limitado e quando o usuário recebe um bônus seu curso é expandido.



Figura 18 – Servomotor



Figura 19 - Potenciômetro no pedal

Para testá-lo, o kart foi colocado sobre um cavalete, e com ele ainda desligado, realizada a calibração do ponto de máximo e mínimo do pedal (Figura 19) e do motor. Posteriormente, o kart for ligado e o pedal acionado. Foi verificado que o sistema responde em tempo real, sem atraso que causaria descontentamento no jogador, e que também está dimensionado corretamente, pois se manteve em zero quando não houve acionamento e atingiu a máxima abertura no acionamento máximo do pedal.

3.2: Sistema de posicionamento

À integração final do sistema de posicionamento ficou a seguinte: o computador se conecta à IMU através de um barramento I2C e a cada etapa de estimação requisita as medidas, as mensagens do GPS são recebidas passivamente através da porta USB numa frequência de vinte vezes por segundo. O teste foi realizado em um carro, sendo o GPS posicionado sobre o capo e a IMU no painel do passageiro da frente. Os dados foram processados on-line e os resultados armazenados para posterior apresentação. A seguir podemos ver os gráficos referentes as grandezas mais relevantes ao projeto:

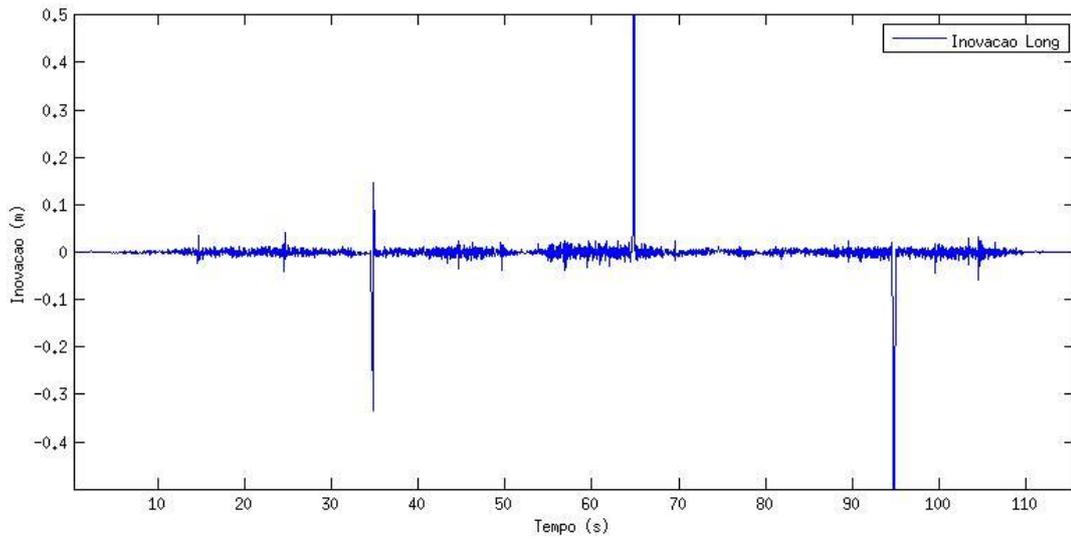


Figura 20 - Inovação na longitude (metros)

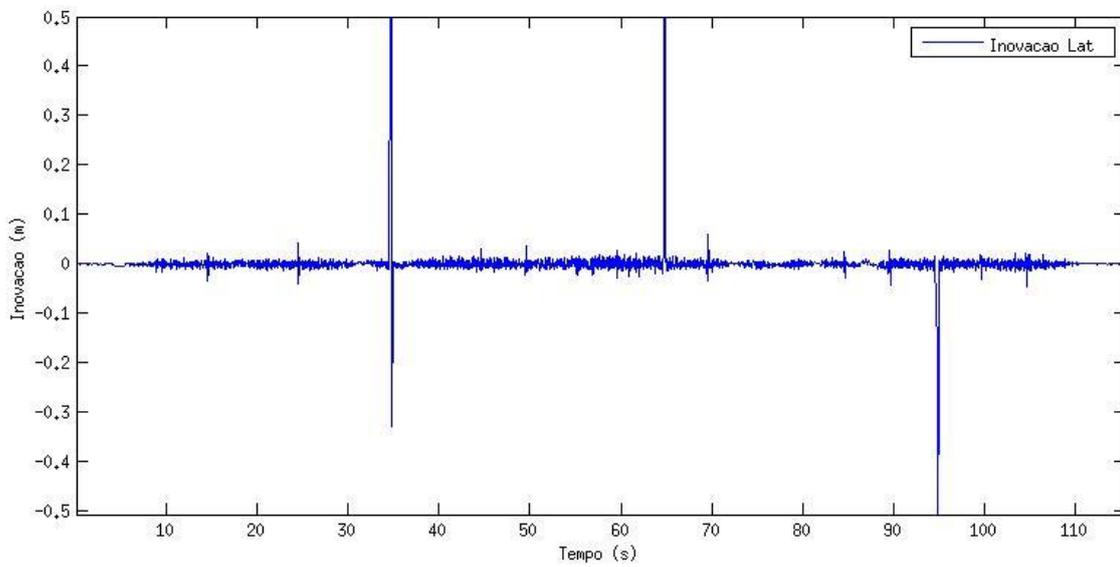


Figura 21 - Inovação na latitude (metros)

Como podemos ver nas Figura 20 e Figura 21, e é também confirmado matematicamente, a média da inovação está suficientemente perto de zero para considerar que o filtro de Kalman foi bem implementado. Também podemos ver que o sistema como um todo tem uma boa performance, uma vez que a maioria da inovação está dentro da faixa de dois centímetros. Estes picos de inovação presentes nos gráficos não são causados pelo algoritmo de posicionamento e sim pela aquisição de dados, como o programa não estava sendo executado em um *kernel* de tempo real, algum outro programa de alta prioridade estava preemptando-o e impedindo-o de executar os cálculos.

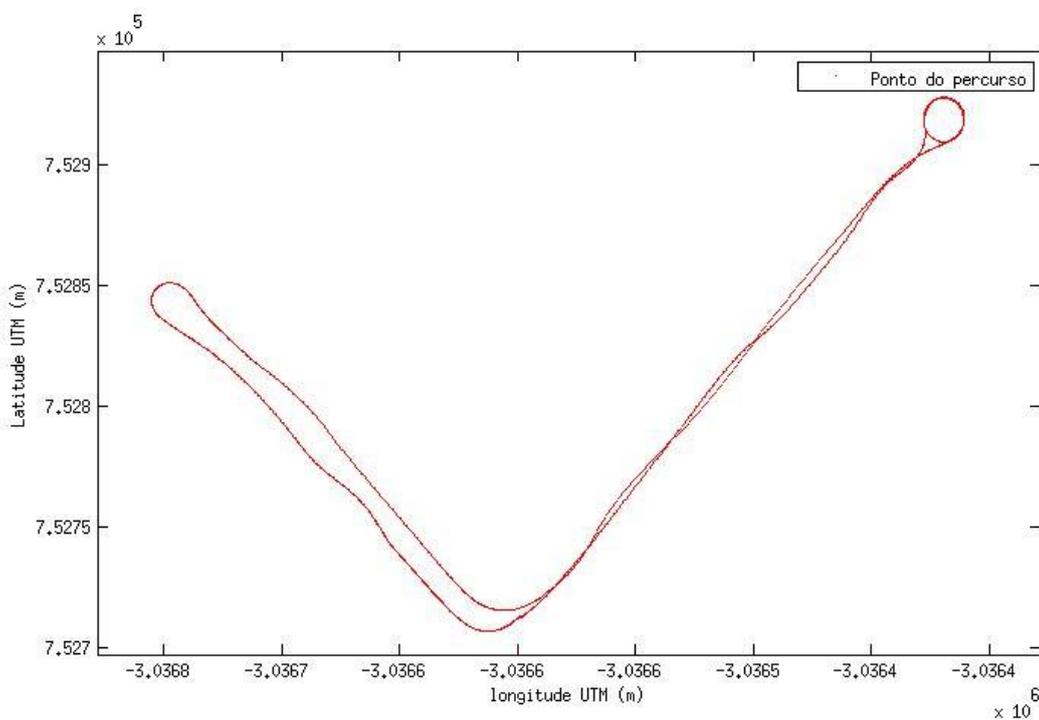


Figura 22 - Trajeto percorrido (metros)

No percurso podemos perceber várias ondulações. Estas ondulações não são ruído de medição e sim provocadas intencionalmente para testar a resposta do sistema a dinâmicas mais rápidas.

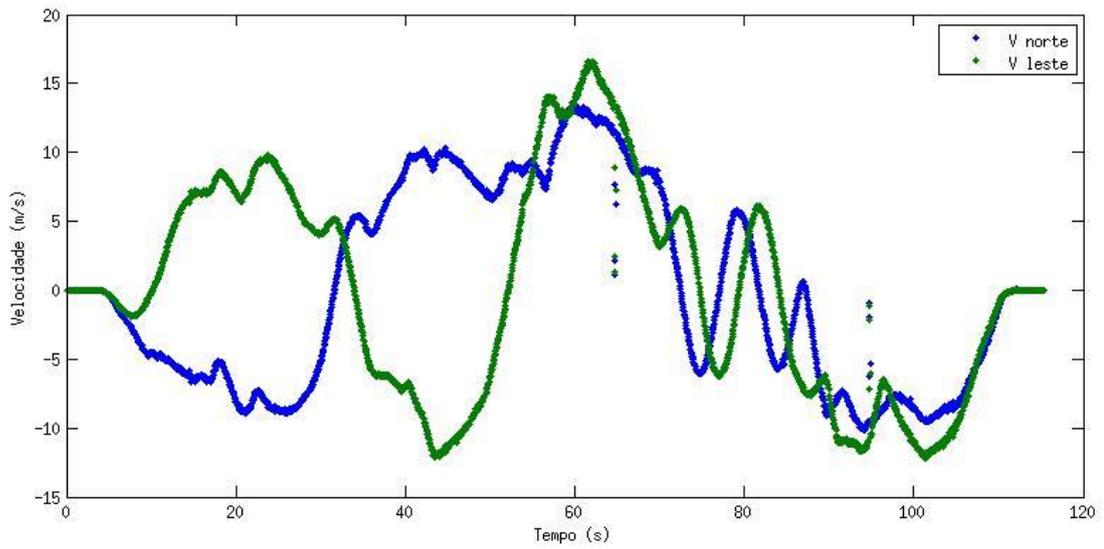


Figura 24 - Velocidades Norte (azul, m/s) e Leste (verde, m/s).

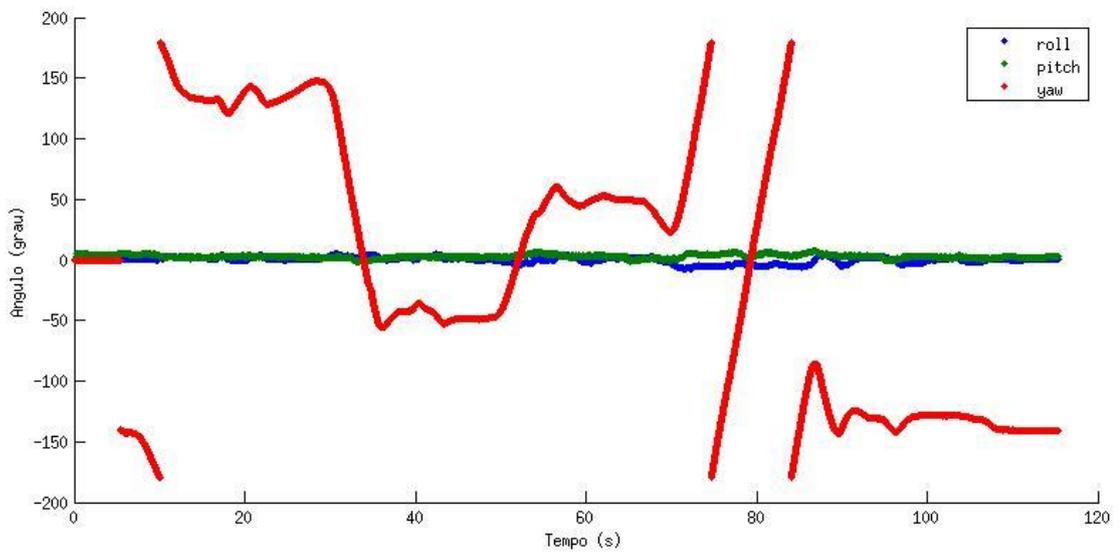


Figura 25 - Roll (azul, graus), pitch (verde, graus), yaw (vermelho, graus).

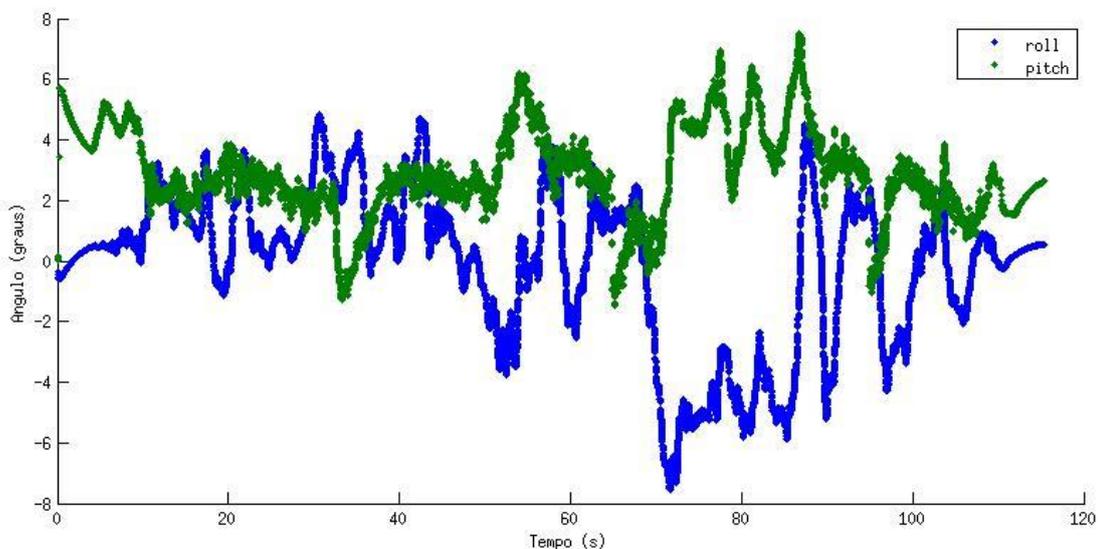


Figura 26 – Zoom em roll (azul, graus), pitch (verde, graus)

Os ângulos de roll e pitch não são vistos pelo usuário final, porém são bons demonstrativos da qualidade do sistema. Apesar das medidas estarem um pouco distantes de zero, que seria o esperado, ainda podem ser consideradas satisfatórias pois o percurso possui várias manobras e mudança de velocidade, além de outro fator que é o amortecimento do carro que modifica a posição do sensor relativa ao carro sendo provavelmente o que ocasionou o pico de erro entre setenta e noventa segundos pois o veículo estava fazendo uma curva fechada.

3.3: Interface gráfica

Um dos componentes principais, se não o principal, do produto final deste projeto é o sistema de visualização do mundo virtual que afetará a corrida real. Como dito brevemente na introdução, duas soluções são viáveis como forma de visualização, realidade aumentada ou realidade virtual. Devido às restrições de tempo deste projeto, nenhuma das duas possibilidades pôde ser explorada, no entanto foi gerada uma interface gráfica simplificada para ser mostrada em um monitor convencional para que o conceito do projeto pudesse ser validado.

3.3.1: Biblioteca gráfica Ogre3D

A interface foi gerada com o auxílio da biblioteca Ogre3D (do inglês, Open graphics engine). A Ogre3D é uma biblioteca multiplataforma escrita em linguagem C/C++ com diversas funcionalidades [17], dentre elas podemos citar:

- Definição de todos os tipos de dados relevantes como pontos 2D, 3D, quaternions e matrizes.
- Sistemas de organização de cena relacional e espacial
- Carregamento de modelos com textura e animação
- Suporte a sistema de partículas, inclusive com diversos exemplos já implementados.
- Sistema de iluminação e sombras
- Acesso a entradas do usuário como mouse e teclado.
- Sistema eficiente de checagem de colisão

Utilizando esta ferramenta foi então implementada uma interface com as seguintes funcionalidades:

- Um modelo 3D de kart, cuja posição no terreno é controlada pelo kart real, através do recebimento via wireless.
- *Power-ups* representados por um míssil e uma banana.
- Caso haja a colisão do kart com algum *Power-up*, uma mensagem é enviada para este kart indicando que foi atingido e o que o atingiu.
- Barreiras indicando os limites da pista, também tendo a funcionalidade de colisão e ricocheteamento dos projéteis.
- Caixas dispostas na pista que quando colididas concedem um *Power-up* ao kart que colidiu.

A seguir temos algumas imagens da versão final da interface gráfica.



Figura 27- Screenshot da interface gráfica na visão do jogador

Na Figura 27 podemos ver as caixas que concedem *power-ups*, o kart, as barreiras da pista e uma banana, que é um *power-up* que pode ser largado na pista e causar lentidão no kart que colidir.



Figura 28 - Visão aérea

Na Figura 28 vemos o kart após adquirir um *power-up* de míssil que pode causar lentidão no oponente atingido.

3.3.2: Testes

As seguintes funcionalidades da interface gráfica foram testadas:

- Recebimento de mensagens de botão de acionamento (Figura 29) advinda do kart, e consequente ativação do *Power-up* quando presente.
- *Power-ups* do tipo banana devem ficar estáticos quando ativados e causar lentidão no jogador que colidir.
- *Power-up* do tipo míssil deve ser disparado quando ativado, ricocheteando nas paredes e causar lentidão no jogador que colidir.

- Caixas de *Power-ups* devem conceder um *Power-up* para o jogador que colidir, caso o mesmo não possua um.

O teste foi realizado com o kart parado, conectado com o servidor, e a movimentação do kart foi simulado através de teclas do teclado. Uma pista virtual foi modelada e caixas de poderes posicionadas, então foram executadas várias combinações de ações para ver a resposta do sistema. Todos os testes foram aprovados, tanto na renderização quanto na resposta do kart, sendo possível ver o servomotor reduzindo a abertura da admissão a cada colisão com um *Power-up*.

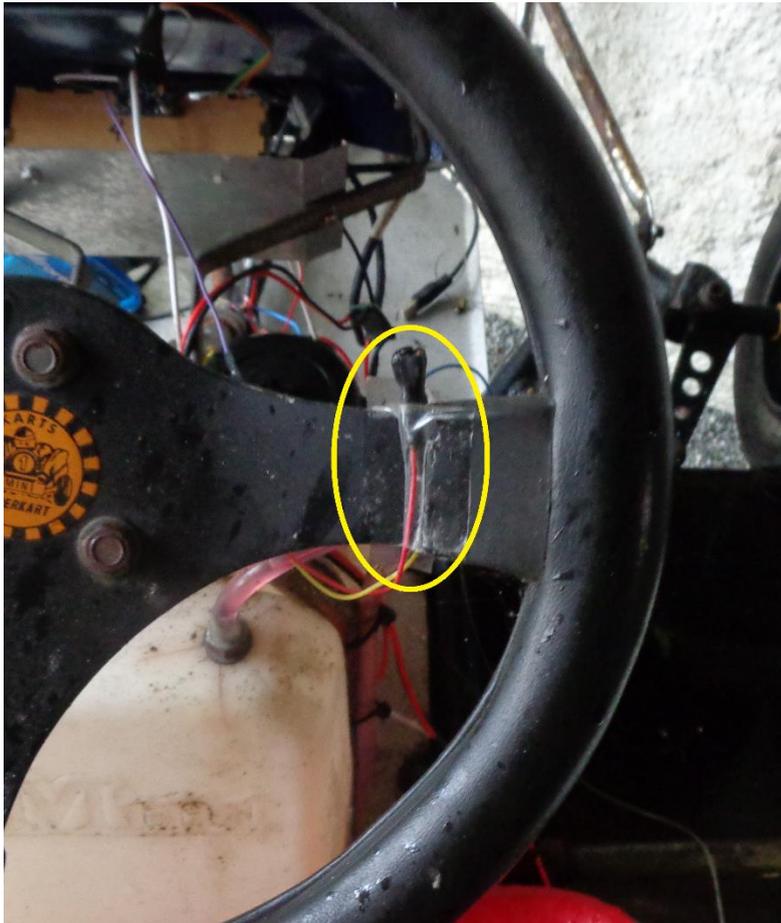


Figura 29 - Botão de acionamento no volante (em destaque)

Conclusões e Discussões

Este projeto teve uma realização complexa devido a abrangência da proposta, foram exploradas áreas como computação embarcada, protocolos de comunicação, redes wireless, computação gráfica, sensores e atuadores e fusão sensorial. Além da produção demonstrada aqui, outra boa parte do trabalho foi a pesquisa para a definição de cada parte do sistema, uma vez que o projeto é pessoal e não possui nenhum supervisor, qual biblioteca escolher, qual componente escolher, quais estratégias tomar.

Ao final do projeto todos subsistemas necessários para um protótipo funcional para o teste de conceito foram desenvolvidos, testados e aprovados. A precisão e frequência de amostragem do sistema de posicionamento são boas e com certeza servirão de base para os avanços futuros do projeto. A interface gráfica funcionou corretamente e serviu ao seu propósito de validar não só tecnicamente, mas também no quesito de atração do consumidor, porém ao término do projeto sua implementação já se provou obsoleta.

Como trabalhos futuros está a implementação da interface gráfica em *frameworks* mais recentes como o *Unreal Engine*® da Epic Games ou o *Unity*® que oferecem suporte nativo a tecnologias como o *Oculus Rift* de realidade virtual. Também estão a implementação do controle de potência em um kart elétrico pois é o modelo mais utilizado nos Estados Unidos e um sistema de posicionamento capaz de atuar em ambientes internos para pistas de kart cobertas.

Referências:

- [1] RTKLib: Biblioteca *Open-source* para correções DGPS do tipo RTK. Disponível em: <http://www.rtklib.com/>, Acesso em: (26/01/16)
- [2] KRUEGER, M.W. - Artificial Reality II, Addison-Wesley, Reading, MA, 1991.
- [3] WATKINS, C. & MARENK A., S.R. - Virtual Reality Excursions, Academic Press, Cambridge, MA, 1994.
- [4] Sistema de posicionamento VN200. Disponível em : <http://www.vectornav.com/products/vn200-rugged> , Acesso em: (26/01/16)
- [5] Sistema de posicionamento Spatial. Disponível em : <http://www.advancednavigation.com.au/product/spatial> , Acesso em: (26/01/16)
- [6] Sistema de posicionamento MTi-G-700. Disponível em : <https://www.xsens.com/products/mti-g-700/> , Acesso em: (26/01/16)
- [7] Fundamentos GPS – sistema de posicionamento global, Disponível em: <http://www.ltc.ufes.br/geomaticsee/Modulo%20GPS.pdf>, Acesso em: (26/01/16), Curso de GPS e cartografia básica, Instituto CEUB de pesquisa e desenvolvimento
- [8] Tedaldi, David, “A Robust and Easy to Implement Method for IMU Calibration without External Equipments”, ICRA, 2014
- [9] E.H.Shin, “Estimation Techniques for Low-Cost Inertial Navigation”, Tese de Doutorado, University of Calgary, Maio de 2005.
- [10] H.D. Lopes, “ Attitude Determination of Highly Dynamic Fixed-wing UAVs with GPS/MEMS-AHRS integration”, American Institute of Aeronautics and Astronautics
- [11] Steven M. LaValle, “Head Tracking for the Oculus Rift”, Oculus VR Inc
- [12] “ Wi-fi range demystified Tutorial”, Xirrus Inc.
- [13] Messias, Sérgio, “Implementação de um filtro de Kalman estendido em arquiteturas reconfiguráveis aplicado ao problema de localização em robótica móvel”, Dissertação de mestrado, DEM, Universidade de Brasília, Abril de 2013
- [14] Oliveira, Diego, “ Implementação de um Sistema de Navegação INS/GPS, Aplicado a Agricultura de Precisão. ”, Trabalho de conclusão de curso, CTC, UFSC, Julho de 2012
- [15] Análise de mercado da Fórmula 1, Disponível em : <http://www.economywatch.com/world-industries/formula-one> , Acesso em: (26/01/16)
- [16] Análise de mercado da Nascar. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/chris-smith/2016/02/17/nascars-most-valuable-teams-grow-even-richer-with-new-charter-system/> , Acesso em: (26/01/16)
- [17] Biblioteca gráfica Ogre3D. Disponível em: <http://www.ogre3d.org/> , Acessado em: (26/01/16)

Referências das figuras:

- [18] <https://piquetjrmania.com/tag/kart/page/2/>
- [19] <http://www.vectorhq.com/vector/gps-satellites-trilateration-101240>
- [20] http://www.blackboxcamera.com/pic-osd/gps_limits.htm
- [21] https://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.aspx
- [22] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/gyroscope/how-a-gyro-works>
- [23] http://senecav.uk/?page_id=832
- [24] <http://www.emlid.com/navio-rtklib/>
- [25] <http://kartsaopaulo.com/site/1/pg17.asp>
- [26] oculus.com
- [27] microsoft.com