

Separating Degrees of Freedom for Object Manipulation in VR

Filipe Relvas, Daniel Mendes, Alfredo Ferreira and Joaquim Jorge
INESC-ID Lisboa, Técnico Lisboa, Universidade de Lisboa

Email: {filiperelvas, danielmendes, alfredo.ferreira, jorgej}@tecnico.ulisboa.pt

Abstract—Manipulating objects is an essential aspect in virtual environments. Nonetheless, object positioning in immersive virtual environments relying in direct and natural approaches is still difficult. Previous research concluded that degrees-of-freedom separation in mouse and touch interfaces led to positive results. In this document we present a user evaluation to assess if explicit separation of degrees-of-freedom also benefits mid-air manipulation tasks. We implemented a virtual widget based technique that allows users to control a single DOF, and compared it against a direct approach and the PRISM technique, which adjusts the ratio between the hand and object movement. The results of our assessment suggest that full DOF separation benefits precision in spatial manipulations, at the expense of additional time for complex tasks. From these results we proposed a new technique that combines different aspects from the three techniques compared in our assessment.

Index Terms—3D user interfaces, virtual reality, mid-air interactions, object manipulation, DOF separation.

I. INTRODUÇÃO

Tem-se testemunhado um interesse crescente em realidade virtual (VR), principalmente devido aos avanços tecnológicos que tornaram os *head-mounted displays* (HMD), cada vez mais acessíveis. Ambientes virtuais imersivos (IVE) que são possíveis graças a estas tecnologias estão a ser usados com diferentes propósitos, como engenharia, arquitetura, desenvolvimento de videojogos e assim por diante, oferecendo capacidades únicas. Para interagir com estes ambientes virtuais (VE), a habilidade de manipular objetos é uma funcionalidade essencial. Apesar das abordagens diretas que replicam interações com o mundo físico serem as mais naturais, é ainda difícil colocar um objeto virtual no local desejado com um elevado grau de precisão. Estas dificuldades podem surgir devido a diferentes fatores, tais como as limitações na destreza humana e a falta de precisão em sistemas de seguimento dos utilizadores. Neste artigo estudamos o impacto da separação de graus de liberdade (DOF) em manipulação de objetos no ar, comparando três técnicas de manipulação baseadas na literatura existente. A primeira segue uma abordagem direta, a segunda escala o movimento do utilizador e a terceira é a nossa implementação de *widgets* no ar para separação de DOF, como é ilustrado na Figura 1.

II. TRABALHO RELACIONADO

Devido à sua importância, a manipulação de objetos em VEs tem sido alvo de investigação há bastante tempo, cobrindo diferentes paradigmas de interação. De forma a ultrapassar a diferença entre os DOF de input e de output, a maior parte das técnicas baseadas no rato recorrem a *widgets*, reduzindo o número de DOF manipulados simultaneamente. Estas técnicas alcançaram tanta popularidade que ainda são usadas atualmente em aplicações comerciais comuns. De forma distinta das técnicas com rato, as superfícies sensíveis ao toque permitem aos utilizadores tocar diretamente nos objetos mostrados. Apontando para interações mais naturais, investigadores propuseram técnicas para controlar vários DOF simultaneamente [1], [2]. No entanto, a redução de DOF controlados foi mais tarde sugerido [3] e seguido por vários autores. Eden [4] e LTouchIt [5] recorreram a uma abordagem direta para translações de objetos, enquanto separam movimentos horizontais e verticais, e efetuam rotações através de *widgets* virtuais. tBox [6], um widget de transformação 3D que surge como uma caixa envolvente em *wireframe*, favorece o controlo independente de 9 DOF. De forma semelhante, Gimbal Box [7] também usa um *widget* em formato de cubo para separar DOF durante a manipulação, tendo os seus autores concluído que *widgets* adaptados são superiores

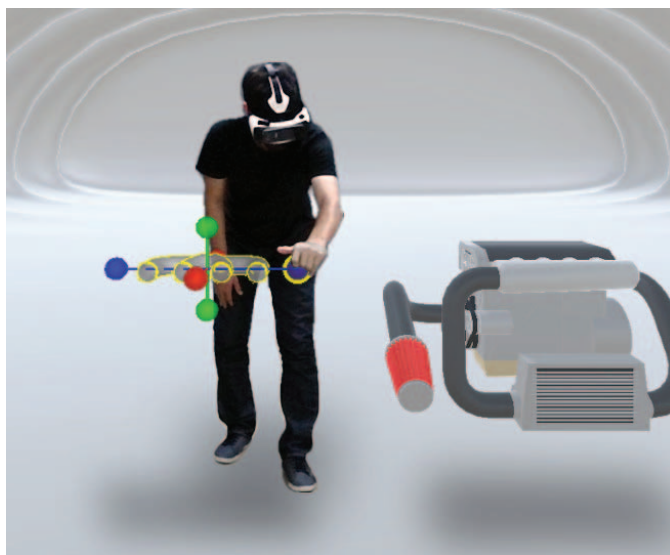


Fig. 1: Utilizador a mover um objeto no ar com *widgets*

às restantes abordagens em ambientes multi-toque. *Tabletops* estereoscópicos semi-imersivos apresentam diferentes desafios, visto que as imagens surgem num espaço volumétrico. Benko e Feiner [8] subdividiram tarefas 3 DOF em conjuntos de tarefas com 2 DOF e 1 DOF, usando a metáfora do balão metáfora. Triangle Cursor [9] segue uma abordagem semelhante, mas usa dois toques para definir a base de um triângulo, com um cursor no vértice de topo. Para manipular objetos virtuais em 9 DOF, Toucheo [10] utiliza *widgets* na superfície multi-toque.

Apresentando um input com um número de DOF superior, a maior parte das soluções no espaço para a manipulação de objetos virtuais 3D tenta replicar as interações do mundo físico [11], [12]. No entanto, tarefas que dependem de manipulação precisa são difíceis de efetuar com estas técnicas. De forma a ultrapassar estas limitações, Frees et al. [13] propuseram a técnica PRISM, que reduz o movimento da mão de forma a aumentar a precisão. A troca entre um modo direto e um modo preciso ocorre de acordo com a velocidade atual da mão. No modo preciso, o rácio entre o movimento da mão do utilizador e o objeto manipulado aumenta, o que o leva a mover-se mais devagar do que a mão, reduzindo o efeito da instabilidade da mão e criando uma *offset* entre o objeto e a mão. Os resultados da avaliação com utilizadores mostraram um desempenho superior e uma elevada preferência dos utilizadores pelo PRISM, comparativamente com as técnicas de translação tradicionais de abordagem direta. Para a rotação de objetos, o PRISM escala a velocidade angular da mão, algo que os autores concluem como sendo confuso para os utilizadores. Osawa [14] propôs um ajuste de posição que consiste num fator de escala para reduzir o movimento da mão, semelhante ao PRISM, e um ajuste ao ponto de vista que é automaticamente aproximado ao ponto onde o objeto é agarrado, de forma a que o mesmo pareça maior. Estas técnicas mostraram melhorias com alvos pequenos, através da avaliação com utilizadores. A técnica de manipulação 7-Handle [15] consiste num *widget* com um formato triangular contendo sete pontos. A avaliação com utilizadores mostrou que a 7-Handle, quando comparado com a abordagem direta com 6DOF, é apenas adequada para objetos de grandes dimensões.

Em resumo, a separação de DOF através de *widgets* favorece a performance tanto em interfaces com rato como em interfaces baseadas em toque, incluindo ambientes estereoscópicos. Para melhorar a precisão dos utilizadores em interações no ar, investigadores tentaram diminuir o movimento da mão ou mover o ponto de vista para uma zona mais próxima do objeto, mas sem ter em conta a separação de DOF. Abordagens baseadas em *widgets* virtuais já foram propostas, mas não atingiram resultados promissores, possivelmente devido às diferenças em relação às alternativas noutras interfaces, à complexidade e ao uso de referências pouco comuns, como os eixos do objeto ou do mundo. Acreditamos que a separação explícita de DOF no espaço usando *widgets* virtuais familiares pode levar ao aumento de performance dos utilizadores em tarefas de manipulação de objetos.

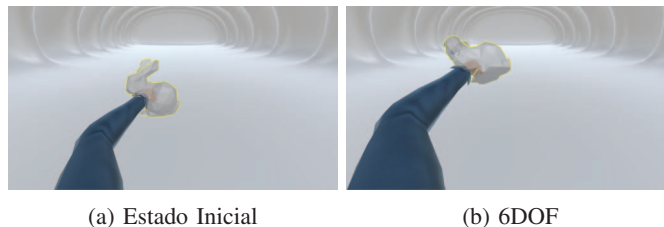


Fig. 2: Técnica 6DOF

III. AVALIAÇÃO DA SEPARAÇÃO DE DOF NO AR

Como a separação de DOF mostrou resultados positivos em interações com rato e toque para a manipulação de objetos virtuais 3D, conduzimos uma avaliação com utilizadores para determinar se também beneficia manipulações espaciais em IVE.

A. Técnicas de Manipulação Implementadas

Para a nossa avaliação, implementámos três técnicas baseadas na literatura, que são descritas de seguida. Todas oferecem transformações com 6 DOF: três para a translação e três para a rotação.

a) *6DOF ou Manipulação Direta*: De forma a replicar interações com objetos físicos, a manipulação direta usa toda a informação dos 6 DOF da mão dos utilizadores [11]. É vulgarmente usada como referência para avaliações de outras técnicas [13], [16], [15]. Consiste em agarrar o objeto diretamente, movendo-o para uma nova localização e/ou rodando-o, largando-o de seguida. Depois de agarrado, o objeto segue diretamente a mão: arrastar muda o objeto de posição e rotações do pulso controlam as rotações do objeto. Todas as transformações são aplicadas ao objeto simultaneamente, como é possível ver na Figura 2. O ponto onde o objeto foi agarrado mantém-se como o centro de todas as transformações ao longo de toda a manipulação, até o objeto ser largado.

b) *PRISM*: Implementámos a técnica PRISM como é descrita em [13]. O movimento da mão em cada eixo de coordenadas é reduzido quando os utilizadores movem as mãos mais devagar que o valor limite pré-definido naquele eixo. Usámos o valor limite proposto pelos autores. Isto resulta na acumulação de uma distância entre a mão e o objeto manipulado (Fig. 3), que pode ser cancelado movendo a mão acima do mesmo valor limite. A rotação segue o mesmo princípio que a translação, mas aplicada à rotação do pulso. Como sugerido pelos autores, apresentamos a acumulação de

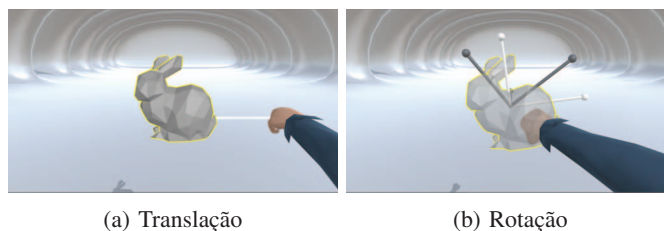


Fig. 3: Técnica PRISM

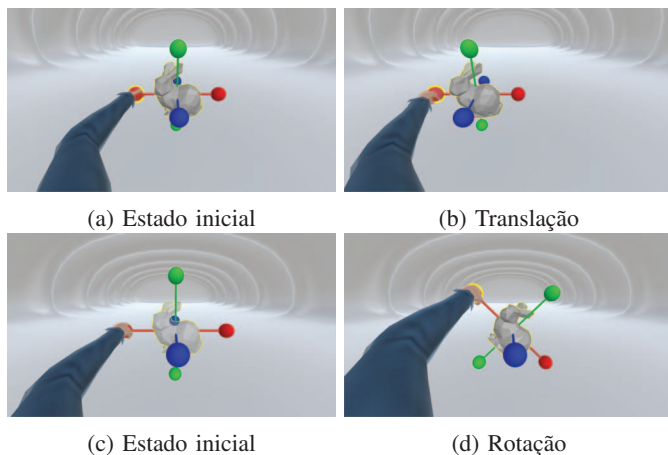


Fig. 4: Técnica Widgets

distâncias com uma linha branca para as translações, e dois conjuntos de eixos para as rotações. De forma semelhante à técnica 6DOF, tanto as translações como as rotações podem ser efetuadas simultaneamente.

c) *Widgets para a separação de DOF*: A nossa abordagem com *widgets* segue estritamente a separação de DOF. Não só as operações de translação e rotação podem ser tratadas de forma independente, como os utilizadores podem manipular um DOF de cada vez. Usámos uma representação similar à introduzida em [17]. Os utilizadores podem agarrar a esfera pertencente ao eixo desejado e mover a mão ao longo do mesmo para efetuar translações sobre o objeto. Para rotações a abordagem é semelhante, mas o movimento da mão é feito em redor do eixo pretendido. A decisão para realizar uma translação ou uma rotação é tomada com base no caminho percorrido pela mão ao fim de 10 cm. A transformação e o eixo escolhidos são bloqueados até a esfera selecionada ser largada.

B. Metodologia

Cada sessão de utilizador durou aproximadamente 45 minutos. Começámos por fazer uma pequena introdução sobre a experiência, seguida de uma breve descrição das técnicas. As técnicas foram realizadas de forma alternada, seguindo um design Latin-Square. Para cada técnica foi mostrado um vídeo tutorial, após o qual os participantes tinham um período de treino máximo de 3 minutos num ambiente dedicado. A seguir a este período, foi pedido aos participantes que efetuassem um conjunto de tarefas. Depois de completarem o conjunto de tarefas de cada técnica, os participantes preencheram um questionário sobre os aspetos distintos da interação. A sessão era concluída com um questionário de perfil.

a) *Tarefas*: Pedimos aos participantes para completarem seis tarefas por técnica. Todas consistiam numa tarefa de acoplamento [13], [3], [16], onde os participantes tinham que colocar um bloco com tubos de escape no local correto de um motor de automóvel. O bloco era o único objeto no nosso ambiente virtual que podia ser manipulado. O modelo

do motor apresentava uma réplica translúcida dos tubos no local correto. De forma a evitar sessões demasiado longas, cada tarefa estava limitada a 3 minutos. Após atingirem este limite, os participantes eram informados que podiam parar e considerávamos a posição e orientação do objeto como finais. Para a primeira tarefa (Fig. 5a), o objeto a manipular começava com a posição ao longo do eixos Y e Z da cena e a orientação corretas, estando apenas com a posição incorreta de acordo com a coordenada X. De forma similar na segunda tarefa (Fig. 5b), o objeto começava com a orientação correta, mas com a posição incorreta nos três eixos de coordenadas. A terceira tarefa (Fig. 5c) consistia em rodar o objeto em torno do eixo Z, enquanto a quarta tarefa (Fig. 5d) requeria rotação em torno de um eixo arbitrário, sem translação. Na quinta tarefa (Fig. 5e), era pedido que o objeto fosse rodado em torno de Z e movido ao longo dos eixos X e Y. Por fim, na última tarefa (Fig. 5f), os participantes tinham que aplicar transformações segundo 6 DOF. Apesar de algumas tarefas precisarem apenas de um tipo de transformação (translação ou rotação), nenhuma estava limitada, pois não tivemos intenção de modificar qualquer uma das técnicas para acomodar uma tarefa específica.

C. Configuração e Protótipo

A nossa configuração contém seguimento não invasivo dos utilizadores, através de três câmaras de profundidade Microsoft Kinect V2. Uma foi colocada virada para o utilizador enquanto as restantes se encontravam a 90 graus da primeira, em cada um dos lados. Visto que o Microsoft Kinect é incapaz de providenciar dados da orientação da mão com um elevado grau de confiança, desenvolvemos um aparelho sem fios para adquirir esses dados com maior precisão. Este aparelho, baseado numa placa de circuitos Arduino, inclui um IMU para um seguimento preciso em 3 DOF e um módulo Bluetooth LE. Colocamos o aparelho na mão dominante do utilizador usando um clip em acrílico, que assegura que o mesmo não caí. Um sensor de pressão deteta se a mão está aberta ou fechada. Para a visualização do ambiente virtual, usámos um Gear VR com um Samsung Galaxy S6, ligado por Wi-Fi ao nosso servidor de seguimento. Usámos o Unity3D para o desenvolvimento do nosso protótipo, com gravidade e colisões entre objetos desativadas. De forma a melhorar o *feedback* dado aos utilizadores ao agarrar os objetos, os mesmos ficam transparentes, revelando a porção ocupada pela mão [18]. Para guiar os participantes durante as tarefas, o objeto muda para a cor verde de forma gradual, ao aproximar-se da posição e orientação objetivo (Fig. 5d).

D. Aparato e Participantes

A experiência foi realizada no nosso laboratório, com um ambiente calmo e controlado (Fig. 6). Contámos com 21 participantes (5 do sexo feminino), com idades entre os 18 e os 50 anos, com a grande maioria (62%) entre 18 e 25. A maioria tinha pelo menos uma licenciatura (86%), enquanto os restantes se encontram a terminá-la. Mais de metade (52%) nunca experimentaram um ambiente de realidade virtual, e

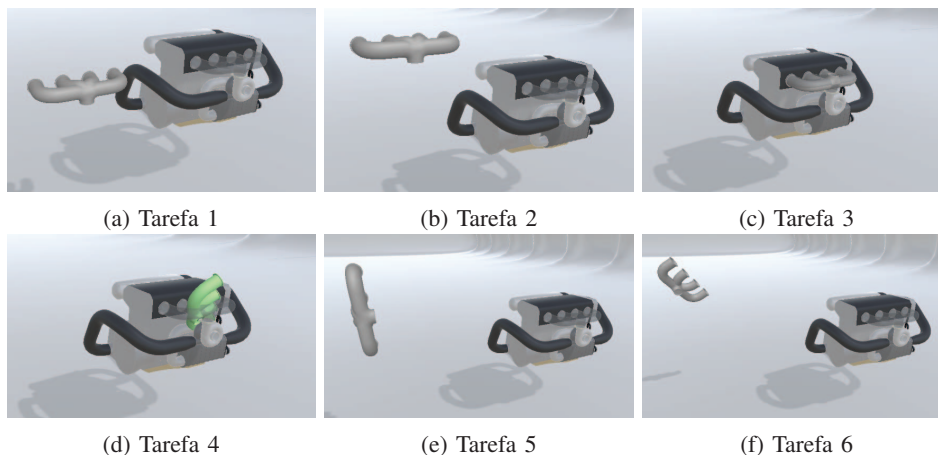


Fig. 5: Tarefas realizadas pelos participantes

43% usam algum tipo de sistema de reconhecimento de gestos mais do que uma vez por mês, como o Xbox Kinect, Wii Remote ou o Playstation Move. Apenas 28% dos participantes usam sistemas de modelação 3D pelo menos uma vez por mês.

E. Resultados e Discussão

Recolhemos dados objetivos através de mecanismos de *logging* e dados subjetivos mediante o preenchimento de questionários. Usamos o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos dados. De seguida corremos o teste ANOVA para medidas repetidas com correção de Greenhouse-Geisser para encontrar diferenças significativas nos dados com distribuição normal, e os testes não paramétricos de Friedman com teste post-hoc de Wilcoxon-Signed Ranks. Em ambos os casos, os testes post-hoc usaram uma correção de Bonferroni (sig. corrigido = sig. \times 3).

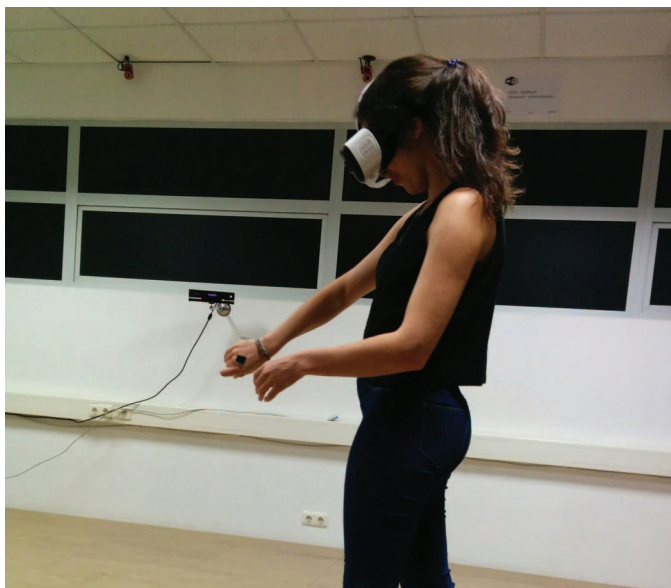


Fig. 6: Participante durante a sessão de avaliação

1) *Dados Objetivos*: Medimos o tempo levado pelos participantes em cada tarefa, assim como o erro no posicionamento do objeto, retratado nos gráficos da Figura 7. Registámos tanto o erro na posição como na rotação.

Para as tarefas de translação, encontrámos diferenças estatisticamente significativas no tempo de conclusão (Tarefa 1: $\chi^2(2)=25.368$, $p<.0005$; Tarefa 2: $F(1.611,30.604)=9.025$, $p=.002$). Para a primeira tarefa, o teste post-hoc revelou a abordagem com Widgets ($\bar{x}=25s$) como sendo mais rápida quando comparada com a 6DOF ($\bar{x}=59s$, $Z=-3.542$, $p<.0005$) e o PRISM ($\bar{x}=90s$, $Z=-3.823$, $p<.0005$), e a 6DOF mais rápida que o PRISM ($Z=-3.267$, $p=.003$). Na segunda tarefa, o PRISM ($\bar{x}=102s$) foi significativamente mais lento que os Widgets ($\bar{x}=49s$, $p=.008$) e a 6DOF ($\bar{x}=71s$, $p=.028$). Em relação ao erro na posição, também foram encontradas diferenças (Tarefa 1: $F(1.851,24.066)=17.474$, $p<.0005$; Tarefa 2: $F(1.359,14.946)=6.653$, $p=.015$), com os Widgets (Tarefa 1 $\bar{x}=3.3mm$; Tarefa 2 $\bar{x}=5.2mm$) a apresentarem um desempenho superior à 6DOF ($\bar{x}=15.0mm$, $p<.0005$) na primeira tarefa e ao PRISM na primeira ($\bar{x}=10.7mm$, $p=.002$) e na segunda tarefas ($\bar{x}=12.2mm$, $p=.003$). A técnica usada também influenciou o erro na rotação (Tarefa 1: $\chi^2(2)=24.500$, $p<.0005$; Tarefa 2: $\chi^2(2)=15.000$, $p=.001$), com os Widgets (Tarefa 1 $\bar{x}=0.0^\circ$, Tarefa 2 $\bar{x}=0.0^\circ$) a atingirem um erro menor que a 6DOF (Tarefa 1: $\bar{x}=11.7^\circ$, $Z=-3.724$, $p<.0005$; Tarefa 2: $\bar{x}=9.8^\circ$) e o PRISM (Tarefa 1: $\bar{x}=7.3^\circ$, $Z=-3.408$, $p=.003$; Tarefa 2: 7.1° , $Z=-2.803$, $p=.015$). É possível que os Widgets tenham apresentado um desempenho superior à 6DOF e ao PRISM na primeira tarefa, por causa da separação de DOF. Visto que esta tarefa exigia que o objeto fosse movido ao longo de um eixo, a possibilidade de manipular com tal restrição permitiu aos utilizadores evitar rotações e translações inesperadas, prevenindo possíveis erros. O mesmo princípio aplica-se ao tempo de conclusão, porque os utilizadores não precisaram de corrigir erros. De forma similar a segunda tarefa apresentou melhores resultados que os Widgets tanto no erro de translação como de rotação, apesar do tempo levado pelos utilizadores não ter diferenças significativas para o 6DOF.

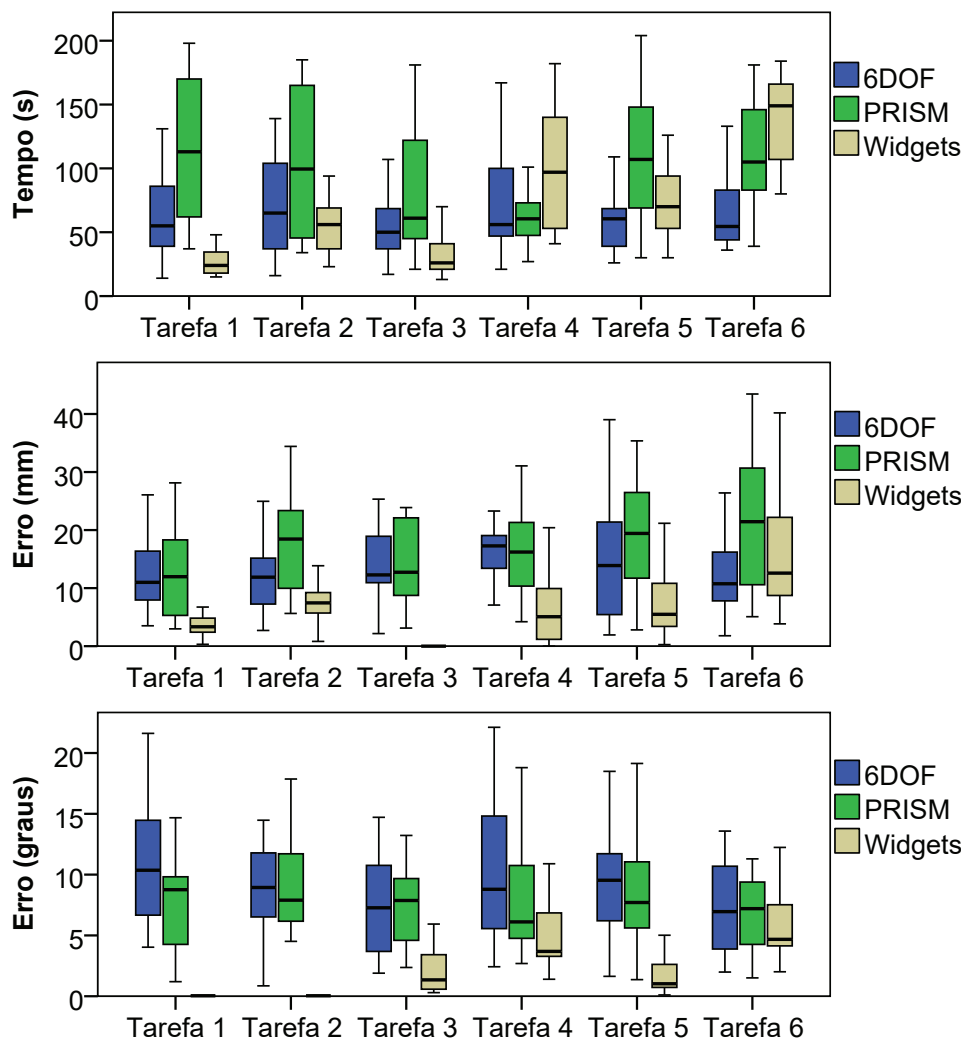


Fig. 7: Tempo gasto e erro de posicionamento (Caixas: mediana, primeiro e terceiro limite interquartil; bigodes: intervalo de confiança de 95%)

Acreditamos que tal tenha acontecido porque a separação de transformações presentes na técnica com Widgets, tornou um caminho direto para o objetivo impossível, obrigando os utilizadores a mover nos três eixos em separado.

No segundo par de tarefas focámo-nos nas rotações. Diferenças significativas no tempo de execução foram apenas encontradas na terceira tarefa ($\chi^2(2)=20.985$, $p<.0005$), na qual o uso de Widgets ($\bar{x}=27s$) reduziu o tempo quando comparado com a 6DOF ($\bar{x}=53s$, $Z=-3.053$, $p=.006$) e o PRISM ($\bar{x}=58s$, $Z=-3.823$, $p<.0005$). Para ambas as tarefas, o erro de posição revelou diferenças significativas dependendo da técnica usada (Tarefa 3: $\chi^2(2)=16.545$, $p<.0005$; Tarefa 4: $F(1.619,14.575)=6.586$, $p=.012$). Os Widgets (Tarefa 3 $\bar{x}=0.0mm$, Tarefa 4 $\bar{x}=9.7mm$) levaram a um melhor posicionamento do que a 6DOF em ambas as tarefas (Tarefa 3: $\bar{x}=13.3mm$, $Z=-3.296$, $p=.003$; Tarefa 4: $\bar{x}=15.7mm$, $p=.008$), e que o PRISM na terceira tarefa ($\bar{x}=16.6mm$, $Z=-3.059$, $p=.006$). O erro na rotação foi também significativamente afe-

tado pelas técnicas (Tarefa 3: $\chi^2(2)=20.118$, $p<.0005$, Tarefa 4: $\chi^2(2)=16.545$, $p<.0005$). Uma vez mais os Widgets (Tarefa 3 $\bar{x}=1.8^\circ$, Tarefa 4 $\bar{x}=5.3^\circ$) apresentaram uma performance superior à 6DOF em ambas as tarefas (Tarefa 3: $\bar{x}=8.8^\circ$, $Z=-3.547$, $p<.0005$; Tarefa 4: $\bar{x}=8.7^\circ$, $Z=-2.868$, $p=.012$) e ao PRISM na terceira tarefa ($\bar{x}=7.1^\circ$, $Z=-3.574$, $p<.0005$). De forma semelhante ao primeiro par, a terceira e quarta tarefa mostraram resultados vantajosos para os Widgets tanto no erro de translação como no erro de rotação. Apesar do foco destas tarefas ter mudado da translação para rotação, a possibilidade de separar transformações mostrou-se significativa uma vez mais. O tempo superior de conclusão encontrado na quarta tarefa foi uma consequência das rotações em todos os eixos. Os utilizadores mostraram-se confusos e incapazes de perceber facilmente as rotações necessárias para chegar ao objetivo.

O último par de tarefas requeria tanto translações como rotações. Em ambos os casos, as técnicas tiveram impacto no tempo gasto pelo participantes para completar as tare-

	6DOF	PRISM	Widgets
Facilidade*	4 (1)	2 (1)	4 (1)
Translação	4 (2)	4 (1)	4 (1)
Rotação*	3 (2)	2 (1)	4 (2)
Diversão*	3 (2)	2 (1)	4 (2)

* indica significância estatística

TABELA I: Preferência dos participantes em cada técnica, em relação a diferentes critérios (Mediana, intervalo interquartil)

fas (Tarefa 5: $F(1.422,27.021)=12.645$, $p<.0005$; Tarefa 6: $\chi^2(2)=27.900$, $p<.0005$). Enquanto que na quinta tarefa o PRISM ($\bar{x}=102s$), foi mais lento que os Widgets ($\bar{x}=72s$, $p=.004$) e a 6DOF ($\bar{x}=63s$, $p=.003$), na sexta os Widgets ($\bar{x}=135s$) demoraram mais que o 6DOF ($\bar{x}=55s$, $Z=-3.920$, $p<.0005$) e o PRISM ($\bar{x}=112s$, $Z=-2.520$, $p=.036$). A 6DOF foi também mais rápida que o PRISM na última tarefa ($Z=-3.323$, $p=.003$). Em ambas as tarefas, houve diferenças em relação ao erro no posicionamento do objeto (Tarefa 5: $\chi^2(2)=8.533$, $p=.014$, Tarefa 6: $F(1.671,23.391)=5.232$, $p=.017$). Os Widgets ($\bar{x}=6.6mm$) reduziram a distância ao alvo na quinta tarefa quando comparado com a 6DOF ($\bar{x}=15.1mm$, $Z=-2.809$, $p=.015$) e o PRISM ($\bar{x}=21.4mm$, $Z=-3.010$, $p=.009$). Na última tarefa, a 6DOF ($\bar{x}=11.4mm$) permitiu que os utilizadores colocassem os objeto mais próximo do objetivo quando comparado com o PRISM ($\bar{x}=21.2mm$, $p=.048$). Analisando o erro na rotação, encontramos diferenças significativas apenas na quinta tarefa ($\chi^2(2)=22.625$, $p<.0005$), na qual os Widgets ($\bar{x}=1.1^\circ$) obtiveram melhores resultados que a 6DOF ($\bar{x}=9.2^\circ$, $Z=-3.823$, $p<.0005$) e o PRISM ($\bar{x}=8.9^\circ$, $Z=-3.464$, $p=.003$). As tarefas finais tiveram um aumento na complexidade visto que tanto translações como rotações eram necessárias para a sua conclusão. O tempo gasto para completar estas tarefas foi negativamente afetado por causa do número elevado de operações necessárias. Como consequência o erro de translação e rotação apresentou piores resultados quando comparado com tarefas anteriores, porque o limite imposto por tarefa impedia que os participantes fizessem ajustes finais

Também é importante notar que tanto a 6DOF como o PRISM não apresentam grandes variações ao longo de todas as tarefas, independentemente da sua dificuldade. Para estas técnicas, todas as tarefas são semelhantes após agarrar o objeto, visto que não existem restrições na transformações aplicadas ao mesmo. Tomando a primeira e última tarefa como exemplo, usámos um Teste T, e nenhuma diferença significativa foi encontrada no tempo de conclusão, no erro de translação e no erro de rotação. Para além disso, o PRISM e a 6DOF mostraram de forma consistente resultados semelhantes. Como os autores apontaram, as rotações no PRISM são confusas para alguns utilizadores, o que poderá ter prejudicado a performance geral nas tarefas.

2) *Dados Subjetivos*: Perguntámos aos participantes, o que sentiam sobre cada técnica. Isto incluía, facilidade de utilização, dificuldade de translação e rotação e o fator de diversão. Uma escala de Likert de 1 a 5 foi usada para responder às nossas questões, com o 5 como valor favorável. As respostas estão descritas na Tabela I. Analisando os resultados obtidos, identificámos diferenças significativas na facilidade de uso ($\chi^2(2)=19.547$, $p<.0005$), dificuldade de rotação ($\chi^2(2)=25.352$, $p<.0005$) e fator de diversão ($\chi^2(2)=13.216$, $p=.001$). Os participantes concordaram fortemente que o PRISM foi geralmente mais difícil (Widgets: $Z=-3.716$, $p<.0005$, 6DOF: $Z=-3.157$, $p=.006$) e menos divertido de usar (Widgets: $Z=-3.057$, $p=.006$, 6DOF: $Z=-2.463$, $p=.042$). Os Widgets apelaram mais aos participantes relativamente a rotações no objeto quando comparado com o 6DOF ($Z=-2.863$, $p=.012$) e o PRISM ($Z=-3.874$, $p<.0005$). Os participantes também concordaram que era mais fácil rodar objetos usando a 6DOF em vez do PRISM ($Z=-2.708$, $p=.021$). Não houve diferença na dificuldade de translação, apesar do PRISM sacrificar manipulação direta e tempo pela precisão melhorada. A abordagem com Widgets, apesar de requerer mais esforço em tarefas complexas, foi mais apelativa que as outras técnicas, sendo tão divertida como a manipulação direta, mas com posicionamento final superior.

F. WISDOM

Na sequência dos resultados obtidos, desenvolvemos uma abordagem que reúne os melhores aspetos de cada uma das três técnicas previamente discutidas. A técnica WISDOM (Widgets combining Scaled movements and DOF separation for Object Manipulation), combina a manipulação direta presente na 6DOF, com a separação de DOF disponível nos Widgets e os melhoramentos ao nível da precisão do PRISM. Apesar dos Widgets terem obtido resultados superiores ao nível do erro da translação e da rotação comparativamente com as outras técnicas, em tarefas complexas o número de operações necessárias prejudicava o tempo de conclusão das mesmas. Dando aos utilizadores a possibilidade de alternar entre a

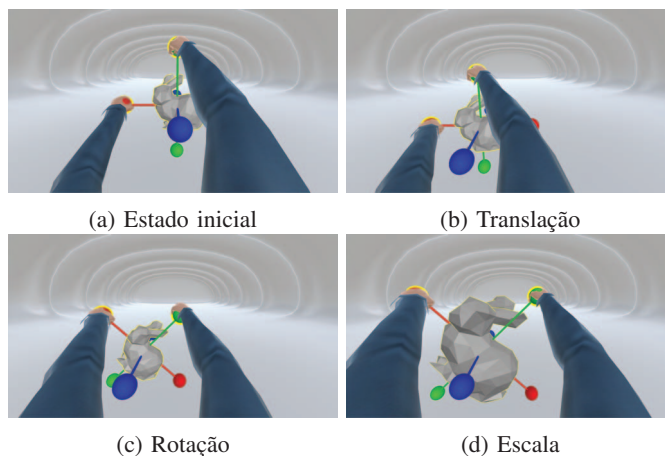


Fig. 8: 2D TRS na técnica WISDOM

manipulação direta e a separação de DOF, acreditamos que é possível melhorar o desempenho nesse campo. Desta forma os utilizadores podem usar os Widgets para ajustes mais modestos e o 6DOF para alterar o posicionamento e orientação do objeto de forma mais célere. De forma a conferir uma precisão superior durante a manipulação, as translações efetuadas com os Widgets apresentam no WISDOM as mesmas particularidades introduzidas pelo PRISM. Movimentos da mão abaixo de um determinado valor limite, provocam uma variação no rácio entre os controlos e o que é exibido, levando ao objeto a mover-se de forma mais lenta que a mão do utilizador. Adicionalmente a nossa abordagem permite o uso de ambas as mãos por parte dos utilizadores de forma a efetuar translações, rotações e escala de forma simultânea (TRS [19]). Para tal é necessário agarrar duas esferas pertencentes a eixos distintos. Os dois eixos definem então um plano sob o qual as transformações são efetuadas.

IV. CONCLUSÃO

Manipulação de objetos é uma das tarefas mais relevantes em ambientes virtuais. Enquanto que gestos no ar em IVE possibilitam interações naturais, é ainda difícil colocar um objecto com precisão. Conduzimos uma avaliação para determinar os benefícios da separação de DOF em manipulação no ar, depois da mesma se ter provado benéfica noutros paradigmas de interação por pesquisa anterior. Concluimos que a separação de DOF apresenta realmente benefícios na redução de erro através de widgets virtuais, com a penalidade de tempos superiores em tarefas complexas. Dos resultados propoemos uma técnica que combina os aspetos positivos das três técnicas estudadas, na tentativa de combater alguns dos problemas que afetavam negativamente tanto o tempo de conclusão das tarefas como o erro na posição e na rotação durante a manipulação de objetos.

AGRADECIMENTOS

O trabalho deste artigo foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através dos projectos TECTON-3D (PTDC/EEI-SII/3154/2012), IT-MEDEX (PTDC/EEISII/6038/2014), UID/CEC/50021/2013 e da bolsa SFRH/BD/91372/2012.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Hancock, T. Ten Cate, and S. Carpendale, "Sticky tools: full 6dof force-based interaction for multi-touch tables," in *ACM ITS'09*, 2009.
- [2] J. Reisman, P. Davidson, and J. Han, "A screen-space formulation for 2d and 3d direct manipulation," in *ACM UIST'09*, 2009.
- [3] A. Martinet, G. Casiez, and L. Grisoni, "The effect of dof separation in 3d manipulation tasks with multi-touch displays," in *ACM VRST'10*, 2010.
- [4] K. Kin, T. Miller, B. Bollensdorff, T. DeRose, B. Hartmann, and M. Agrawala, "Eden: a professional multitouch tool for constructing virtual organic environments," in *ACM CHI'11*, 2011.
- [5] D. Mendes, P. Lopes, and A. Ferreira, "Hands-on interactive tabletop lego application," in *ACM ACE'11*, 2011.
- [6] A. Cohé, F. Dècle, and M. Hachet, "Ibox: a 3d transformation widget designed for touch-screens," in *ACM CHI'11*, 2011.
- [7] B. Bollensdorff, U. Hahne, and M. Alexa, "The effect of perspective projection in multi-touch 3d interaction," in *Graphics Interface 2012*, 2012.
- [8] H. Benko and S. Feiner, "Balloon selection: A multi-finger technique for accurate low-fatigue 3d selection," in *IEEE 3DUI'07*, 2007.
- [9] S. Strothoff, D. Valkov, and K. Hinrichs, "Triangle cursor: interactions with objects above the tabletop," in *ACM ITS'11*, 2011.
- [10] M. Hachet, B. Bossavit, A. Cohé, and J. de la Rivière, "Toucheo: multitouch and stereo combined in a seamless workspace," in *ACM UIST'11*, 2011.
- [11] R. Wang, S. Paris, and J. Popović, "6d hands: markerless hand-tracking for computer aided design," in *ACM UIST'11*, 2011.
- [12] P. Song, W. Goh, W. Hutama, C. Fu, and X. Liu, "A handle bar metaphor for virtual object manipulation with mid-air interaction," in *ACM CHI'12*, 2012.
- [13] S. Frees, G. Kessler, and E. Kay, "Prism interaction for enhancing control in immersive virtual environments," *ACM TOCHI*, vol. 14, no. 1, 2007.
- [14] N. Osawa, "Two-handed and one-handed techniques for precise and efficient manipulation in immersive virtual environments," in *Advances in Visual Computing*, 2008.
- [15] T. Nguyen, T. Duval, and C. Pontonnier, "A new direct manipulation technique for immersive 3d virtual environments," in *ICAT-EGVE 2014*, 2014.
- [16] D. Mendes, F. Fonseca, B. Araujo, A. Ferreira, and J. Jorge, "Mid-air interactions above stereoscopic interactive tables," in *IEEE 3DUI'14*, 2014.
- [17] B. Conner, S. Snibbe, K. Herndon, D. Robbins, R. Zeleznik, and A. Van Dam, "Three-dimensional widgets," in *ACM I3D'92*, 1992.
- [18] M. Prachyabrued and C. Borst, "Visual feedback for virtual grasping," in *IEEE 3DUI'14*, 2014.
- [19] M. S. Hancock, F. D. Vernier, D. Wigdor, S. Carpendale, and C. Shen, "Rotation and translation mechanisms for tabletop interaction," in *First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP'06)*. IEEE, 2006, pp. 8–pp.